

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR
CLAUDE LAJOIE

DÉTERMINATION ET ÉTUDE PHYSIOLOGIQUE DE L'ÉTAT STABLE MAXIMAL DE
LACTATÉMIE SOUTENABLE PENDANT 60 MINUTES CHEZ DES CYCLISTES DE
COMPÉTITION.

DÉCEMBRE 1998

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ.....	iv
REMERCIEMENTS.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
 CHAPITRES	
I. INTRODUCTION.....	1
II. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
Détermination du MLSS.....	5
Résultats de la littérature.....	8
Problème proposé.....	13
Objectifs de recherche.....	14
III. MÉTHODOLOGIE.....	16
Sujets.....	16
Procédure.....	16
Tests progressifs maximaux.....	18
Repère du 4 mM par interpolation linéaire inverse.....	19
Tests continus.....	20
PMS 60.....	21
Test de puissance maximale.....	21
Course.....	22
Statistique.....	23
IV. RÉSULTATS.....	24

	Étape 1: Les tests progressifs maximaux.....	24
	Étape 2: État stable maximal de lactatémie.....	25
	Test continu 1.....	25
	Test continu 2.....	29
	Test continu 3.....	30
	Étape 3: PMS 60.....	30
	Test de puissance maximale.....	45
	Course simulée.....	45
V.	DISCUSSION.....	48
	Test de détermination du MLSS.....	49
	Concentration sanguine de lactate à MLSS.....	51
	Capacité de détermination de la PMS 60.....	54
	Evolution des variables physiologiques.....	55
	Variations séquentielles des variables physiologiques.....	58
	Comparaison entre MLSS et PMS 60.....	59
	Futures recherches.....	61
VI.	CONCLUSION.....	63
	RÉFÉRENCES.....	64
	ANNEXES.....	72

RÉSUMÉ

Des études ont suggéré que l'une des intensités optimales à l'entraînement, pour les sports d'endurance, serait le Maximal lactate steady state (MLSS). Les paramètres de seuil à partir des réponses de la ventilation et de la lactatémie sont des indicateurs valables de la forme physique et d'utiles prédicteurs de la performance en endurance (Housh, 1991).

Le but de cette étude était de valider un test progressif maximal servant à prédire l'état stable maximal de lactatémie (MLSS) sur une heure à l'aide de cycliste d'expérience utilisant leur propre vélo. La plupart des études qui visaient à déterminer un état stable de lactatémie prédisent une puissance d'effort qui pouvait rarement être maintenue pendant près de 60 min. Douze sujets ont exécuté différents tests pour évaluer la puissance d'effort développée à 4 mM lors d'un test progressif utilisant des paliers de 8 min. Notre méthode nous a permis d'obtenir une charge de travail permettant à 11 sujets sur 12 de compléter 60 min au premier essai. Pendant les tests de 60 min à puissance de travail constante, nous avons étudié les variables physiologiques comme la fréquence cardiaque, la $\dot{V}O_2$, la lactatémie, etc. Lors des tests subséquents nous avons observé que l'état stable de lactatémie ($279,2 \pm 42,95$ Watts) était voisin d'une puissance maximale soutenable sur 60 min (PMS 60) ($285,8 \pm 46,21$ Watts). À puissance constante, les paramètres physiologiques dérivent de façon séquentielle. Nous avons observé qu'à MLSS, la fréquence cardiaque varie significativement à 30 min, la $\dot{V}O_2$ ($l \cdot min^{-1}$) à 50 min et la ventilation (\dot{V}_E) à 60 min. À PMS 60, la variation des paramètres physiologiques respecte la même séquence, à des temps différents et plus précoces.

Nous concluons qu'un test progressif avec des paliers de 8 min permet de cerner la puissance de travail pouvant être maintenue pendant 60 min. Notre méthode expérimentale nous a permis d'obtenir une lactatémie stable, au premier essai, chez onze des douze sujets, d'obtenir une puissance maximale soutenable sur une heure en moins de trois essais et finalement de quantifier l'étendue des variations physiologiques en ordre d'apparition.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements et toute ma reconnaissance pour la réalisation de ce mémoire à mon directeur de recherche, François Trudeau, Ph. D., professeur au Département des sciences de l'activité physique, pour les connaissances dont il m'a enrichi, son encadrement et son temps.

Mes remerciements à mon codirecteur de recherche, Louis Laurencelle, Ph. D., professeur au Département des sciences et de l'activité physique, pour la rigueur et l'interprétation raisonnée des statistiques et des méthodes de travail.

Merci à Claude Brouillette, technicien en électronique au Département des sciences de l'activité physique à Trois-Rivières. Sans lui, ce projet n'aurait pu être réalisé de la même façon.

Merci aux athlètes sujets qui se sont portés volontaires dans cette étude, acceptant de se soumettre à une batterie de tests parfois très exigeants. Finalement, merci à Jean Sébastien Zahra, François Dulac et Mylène Dault, mes condisciples, pour leur support à tous points de vue.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques anthropométriques.	p. 17
Tableau 2	Comparaison de puissance à différents moments	p. 26
Tableau 3	Comparaison entre les deux tests progressifs maximaux	p. 27
Tableau 4	Puissance et lactatémie au test progressif maximal.	p. 28
Tableau 5	Variations physiologiques à PMS 60.	p. 32
Tableau 6	Test de puissance supramaximale.	p. 46
Tableau 7	Course simulée.	p. 47

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Seuil anaérobie individuel (IAT)	p. 6
Figure 2	Algorithme de la procédure MLSS	p. 9
Figure 3	Évolution de la lactatémie à MLSS et PMS 60.	p. 34
Figure 4	Évolution de la fréquence cardiaque à MLSS et à PMS 60.	p. 35
Figure 5	Évolution de la $\dot{V}O_2$ à MLSS et à PMS 60.	p. 36
Figure 6	Évolution du $\dot{V}O_2 / \text{kg}$ à MLSS et à PMS 60.	p. 38
Figure 7	Évolution de la ventilation minute à MLSS et à PMS 60.	p. 39
Figure 8	Évolution de la $VE / \dot{V}CO_2$ à MLSS et à PMS 60.	p. 40
Figure 9	Évolution du quotient d'échange respiratoire à MLSS et PMS 60.	p. 42
Figure 10	Évolution de l'indice de Borg à MLSS et à PMS 60.	p. 43
Figure 11	Évolution de la $\dot{V}CO_2$ à MLSS et à PMS 60.	p. 44

CHAPITRE I

Introduction

Cette recherche s'inscrit sous le thème de la performance des cyclistes de compétition. Nous voulons vérifier s'il est possible d'utiliser les données d'un test progressif maximal pour prédire la performance des athlètes. En plus de la prédiction, nous nous intéressons à la prescription et au contrôle des entraînements en vue des compétitions dans les sports d'endurance.

Si un athlète doit exécuter efficacement une course contre-la-montre de 40 km, selon son niveau de forme immédiat, il se réfère à certains indices externes et internes pour doser son effort et arriver à destination le plus rapidement possible. Quels sont ces indices? La vitesse à l'odomètre, la fréquence cardiaque, la cadence de mouvement, la perception de fatigue et le temps. En laboratoire, nous avons la possibilité d'ajuster la puissance de travail (Watts) de l'ergocycle, ce que la majorité des athlètes n'ont pas sur le terrain. Depuis peu, une compagnie a mis au point un pédalier qui transmet la puissance de travail qu'un athlète génère sur son propre vélo (SRM, Schorberer Rad Mebtechnik, Welldorf, Allemagne). Pour l'instant, cet appareil est disponible à un prix exorbitant. Par contre, nous sommes convaincu que des appareils de ce type seront disponibles à coût moindre dans un avenir rapproché. L'intérêt de notre étude est de permettre aux athlètes d'utiliser ces appareils sur le terrain en agençant la charge estimée en laboratoire. Ainsi, les mesures en laboratoire seront plus facilement transférable au terrain.

Lorsqu'un athlète doit travailler contre le vent, monter une côte ou affronter d'autres obstacles, il y a toujours le risque qu'il surestime ses capacités. Le défaut des athlètes est bien

souvent qu'ils semblent déployer une trop grande énergie au début de la course. Cet excès affecte la course entière, un des symptômes étant une lactatémie élevée et difficile à résorber.

“ Le traitement des observations (fréquences cardiaques, $\dot{V}O_2$, lactates sanguins) conduit à mettre en évidence l'existence d'un niveau caractéristique de puissance au-delà duquel l'organisme accuse une insuffisance d'adaptation fonctionnelle que la durée de l'épreuve amplifie. Au-delà de cette puissance critique, l'organisme se fatigue. ... Au-dessous de ce niveau d'effort, l'organisme, par contre, est capable de maintenir longtemps en régime stable le fonctionnement de ses divers systèmes sollicités par l'activité musculaire” (*Chassain, 1986, pp. 41-42*) .

L'objectif spécifique de cette recherche est de prédire la puissance de travail la plus élevée qui n'entraîne pas d'accumulation sanguine croissante d'acide lactique pendant une heure. Au delà de cette limite, le système anaérobie serait sollicité de façon croissante, réduisant substantiellement les réserves de glycogène et la possibilité de poursuivre l'exercice plus longtemps. La plupart des épreuves d'endurance qui nécessitent l'utilisation d'un vélo durent généralement plus d'une heure. Par exemple, le triathlon, le duathlon, les épreuves de vélo de montagne et sur route durent tous plus d'une heure. Aussi, le record de l'heure sur piste, qui est une épreuve standardisée et strictement réglementée, procure une référence de puissance de travail maximale, exécutable sur vélo par l'être humain. La littérature de source non scientifique estime que la puissance de travail nécessaire pour réussir le record de l'heure à une vitesse avoisinant les 56 kilomètres par heure, nécessite le déploiement de 430 à 480 Watts. Ces estimés de puissance varient selon le coefficient de pénétration dans l'air (c_x), en partie déterminé par la surface frontale des sujets. Pour contrebalancer le phénomène de résistance exponentielle de pénétration dans l'air, les athlètes doivent optimiser le rendement mécanique de leur vélo (roulement et résistance par le frottement) et ajuster leur position afin d'abaisser le

coefficient d'aérodynamisme et améliorer le rendement biomécanique. En fait, la principale raison du choix de la durée d'une heure, c'est la possibilité de se référer aux valeurs des puissances des records réussis. Ces records sont utiles, ils nous renseignent sur le niveau actuel des sujets face à l'élite internationale.

Les recherches récentes s'interrogent sur l'existence d'un "seuil dit anaérobie"¹, sans approfondir les aspects pratiques de l'état physiologique impliqué pour l'entraînement. Cependant, qu'un seuil anaérobie existe ou non, il est intéressant pour un entraîneur de connaître la puissance maximale qu'un athlète est en mesure de maintenir pendant la durée d'une épreuve.

La connaissance de la puissance limite que l'athlète est capable de maintenir lors d'un effort constant, en tenant compte de la dérive des paramètres physiologiques, est utile pour l'entraîneur. Il lui devient alors possible de planifier l'avenir de façon plus tangible afin de prévoir des charges de travail plus élevées. Ainsi, l'entraîneur est en mesure de fixer des objectifs précis.

Les principaux facteurs utilisés pour prédire la performance dans les sports d'endurance sont la vitesse de course relative au $\dot{V}O_2$ max, la puissance relative au seuil anaérobie, la puissance maximale et la puissance relative à la puissance aérobie maximale. Cela permet de différencier les sujets prometteurs des autres mais aussi de prescrire l'exercice. Ainsi, pour l'entraîneur qui en connaît plus sur les capacités intermédiaires de l'athlète, à des charges plus ou moins intenses que le MLSS, il devient possible de prescrire des charges de travail qui seront plus adaptées à l'athlète. Ainsi, l'entraîneur serait en mesure de prescrire, à l'entraînement, les fractions d'effort optimal nécessaires à des compétitions, sans devoir soumettre les athlètes à

¹ L'utilisation du terme "anaérobie" se fait ici avec les réserves qui s'imposent dans le seul but de référer aux travaux ayant utilisé le terme.

plusieurs tests essais-erreurs, ce qui devient exigeant et néfaste pour la collecte des données comparatives. Par exemple, si on découvre que l'athlète est en mesure d'effectuer 60 minutes à une puissance relative donnée, sans que la fréquence cardiaque et la lactatémie n'augmentent de façon significative à une charge donnée, c'est que l'athlète est en état stable. Par contre, pour améliorer la performance de l'athlète, l'intensité d'effort doit nécessairement progresser au-delà de cette puissance pour une épreuve de la même durée. Alors, combien de temps ce même athlète peut-il tenir à 105, 110, ou 115% de cette puissance initiale? Si l'athlète ne peut passer à travers 105%, alors sa puissance maximale à MLSS se situera entre 100% et 105%. L'entraîneur peut ainsi prescrire l'entraînement avec un minimum d'erreur.

Avant tout, il faut connaître le comportement des facteurs limitatifs tels que la fréquence cardiaque, le $\dot{V}O_2$ et l'augmentation du lactate sanguin. Est-ce qu'un athlète pourrait faire mieux, s'il avait un outil qui lui permet de doser son effort tout au long de sa course et de son entraînement? Est-ce que l'entraînement est dosé selon les capacités de l'athlète? Le temps, la durée de l'effort sont-ils suffisants pour la progression de la forme optimale de l'athlète? Est-ce que la sollicitation est optimale pour atteindre les objectifs de l'athlète? Toutes ces questions ne peuvent être répondues tant et aussi longtemps que nous ne connaissons pas la valeur de puissance maximale soutenable par l'athlète. Cette recherche envisage de valider et de vérifier la fidélité d'un outil, qui permette de déterminer la puissance au MLSS en fonction de la dérive physiologique.

CHAPITRE II

Revue de la littérature

Détermination du MLSS

Le seuil anaérobie individuel (*individual anaerobic threshold IAT* ou *maximal lactate steady state MLSS*) a été défini comme étant le plus haut taux métabolique pour lequel la concentration d'acide lactique est maintenue à l'état stable pendant un exercice de type continu sur ergocycle ou tapis roulant par exemple. Le seuil anaérobie individuel (IAT) a d'abord été défini par Stegmann et al. (1981). Le IAT est déterminé en se servant d'abord de la mesure du lactate sanguin lors d'un test progressif maximal avec palier de quatre minutes et de la phase de récupération. Celui-ci est exprimé par un pourcentage du $\dot{V}O_2$ max ou de la puissance de travail (watts) obtenus lors du test maximal progressif.

A partir des résultats obtenus au test progressif maximal, il faut déterminer la puissance d'effort pour les tests continus subséquents. Deux courbes sont tracées: La première montre la concentration d'acide lactique en fonction du temps à l'exercice tandis que la seconde mesure les mêmes paramètres mais lors de la période de récupération (Figure 1).

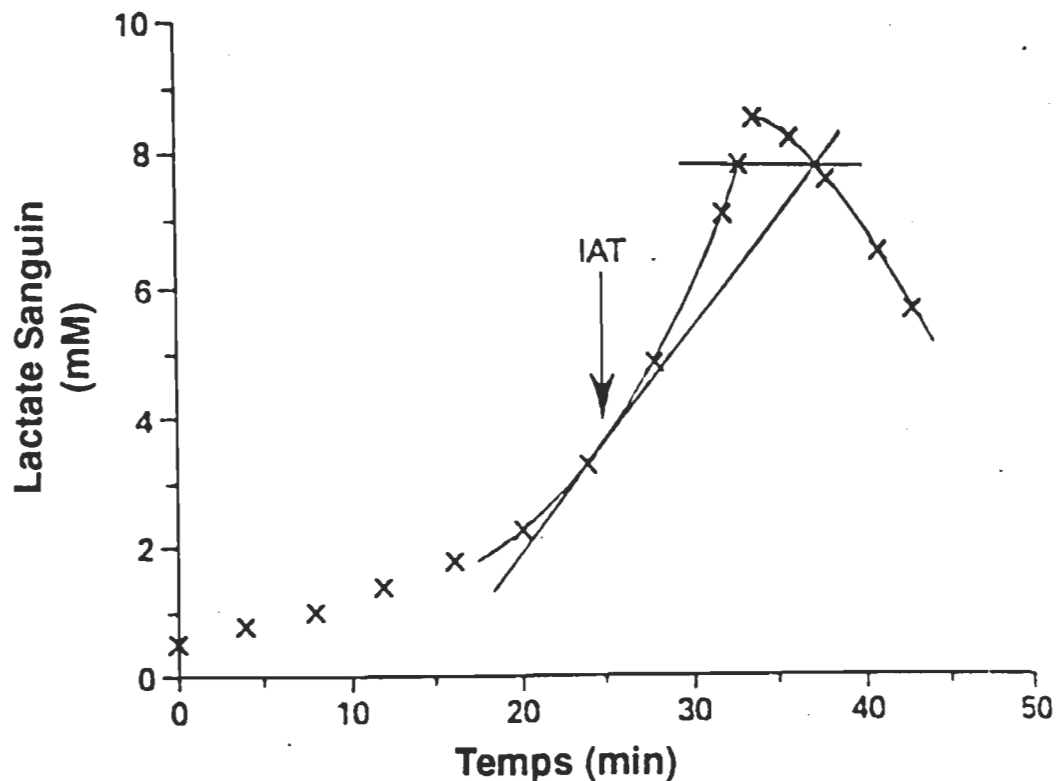


Figure 1. Exemple de la réponse du lactate sanguin pendant un test progressif maximal et une période de récupération active. La flèche indique le temps auquel le test progressif correspond au seuil anaérobie individuel (IAT). (Tiré et traduit de McLellan et Jacobs, 1993)

La courbe lactate-charge à l'exercice peut être tracée selon un modèle de fonction exponentielle simple comme celui de McLellan et Jacobs (1993). À l'aide d'une régression par polynômes du troisième degré, la courbe de la récupération est construite. Une droite horizontale est tracée à partir du point de la fin de l'exercice (conséquemment, à une concentration de lactate donnée) et rejoint la courbe de récupération. On sait que la concentration de lactate est plus élevée dans les premiers instants de la période de récupération, mais on s'attend à ce qu'elle redescende plus tard à des valeurs de repos. La jonction de cette ligne horizontale et de la courbe de récupération nous donne le point permettant de tracer une tangente à la courbe

d'exercice. Ce point de contact de la tangente serait le MLSS (IAT), selon les auteurs, la projection sur l'axe des X du point IAT, déterminée par la tangente, nous permet d'estimer à quelle intensité de travail l'individu a atteint son MLSS.

Une autre façon, apparemment plus simple, d'estimer le MLSS a été développée par Urhausen et al. (1993). Mais les paliers du test progressif sont plus courts (3 min), ce qui n'est pas recommandé par tous (Foxdal et al., 1996), et les mesures en récupération sont moins nombreuses (1, 3, 5 et 10 min.).

À la suite de l'estimation de la puissance au MLSS, McLellan et Jacobs (1993) vérifient si les individus sont capables de maintenir cette charge de travail sans variation de la lactatémie. Ils effectuent donc un protocole d'exercice continu d'une durée de 45 minutes à cette intensité ou jusqu'à épuisement. Des échantillons sanguins sont prélevés à toutes les 5 minutes. Si le sujet n'obtient pas un état stable de lactatémie pendant 45 minutes, alors les prochains tests seront ajustés en conséquence selon un protocole plus ou moins exigeant dépendant des résultats. L'obtention d'une lactatémie stable à une certaine intensité détermine le MLSS. Suite au test à puissance IAT de McLellan et Jacobs (1993), les sujets devaient effectuer deux autres tests à charge fixe. L'intensité de ceux-ci dépendait des résultats obtenus lors des 15 dernières minutes du test MLSS, à condition que les sujets aient maintenu la charge de travail pendant au moins 30 minutes. Le nouveau protocole est le suivant (fig. 2): Si le sujet a obtenu un état relativement stable au premier test continu MLSS, (si la concentration ne varie pas plus de 0,5 mM) alors il doit effectuer le prochain test à la puissance du MLSS + 5% de la puissance du $\dot{V}O_2\text{max}$. Si l'état stable persiste toujours, le sujet exécute un autre protocole à MLSS +7,5% $\dot{V}O_2\text{max}$; Pour ceux chez qui il n'y a pas eu d'état stable, le retest s'effectue à MLSS +2,5% $\dot{V}O_2\text{max}$. Inversement, si le sujet ne rencontre pas les critères de l'état stable au

premier test MLSS, alors il doit faire le prochain test à MLSS $-5\% \dot{V}O_2\text{max}$. L'intensité du dernier test se fera selon le résultat du précédent, c'est-à-dire, à MLSS $-2,5\%$ ou MLSS $-7,5\% \dot{V}O_2\text{max}$. Finalement, le design de cette expérience fait en sorte que chacun des sujets ne soit pas à la même intensité absolue. Les tests sont donc ajustés en fonction des capacités individuelles, ce qui ajoute, selon les auteurs, de la validité à l'expérience.

Weltman (1995) précise que pour des recherches ultérieures, il semble important de régler l'utilisation de l'état stable maximal. La détermination de l'état stable maximal est limitée à des séries de périodes d'exercice prolongé, requises pour déterminer l'état stable individuel en opposition à un seul test par palier progressif. Parce qu'il existe une solide relation entre les mesures variées de la réponse lactatémique à l'exercice (LT, BLC, MLSS, IAT, etc.), il a même été suggéré qu'un protocole utilisant un seul test progressif, pour les seuils lactiques et la concentration lactique sanguine ou le MLSS, soit utilisé pour des projets de recherche (Weltman, 1995).

Résultats de la littérature

Les tests progressifs maximaux qui déterminent la puissance au MLSS semblent fiables, la corrélation entre le test et le retest est de 0,98, correspondant à une erreur de $\pm 8,04$ Watts (McLellan et Jacobs 1993). On peut dire qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux tests. Donc les valeurs obtenues par cette méthode sont reproductibles.

Cependant, le problème réside dans la précision de détermination du MLSS. L'étude de McLellan et Jacobs (1993) démontre que seulement 4 sujets sur 11 ont dépassé 30 minutes d'exercice à leur valeur MLSS prédite

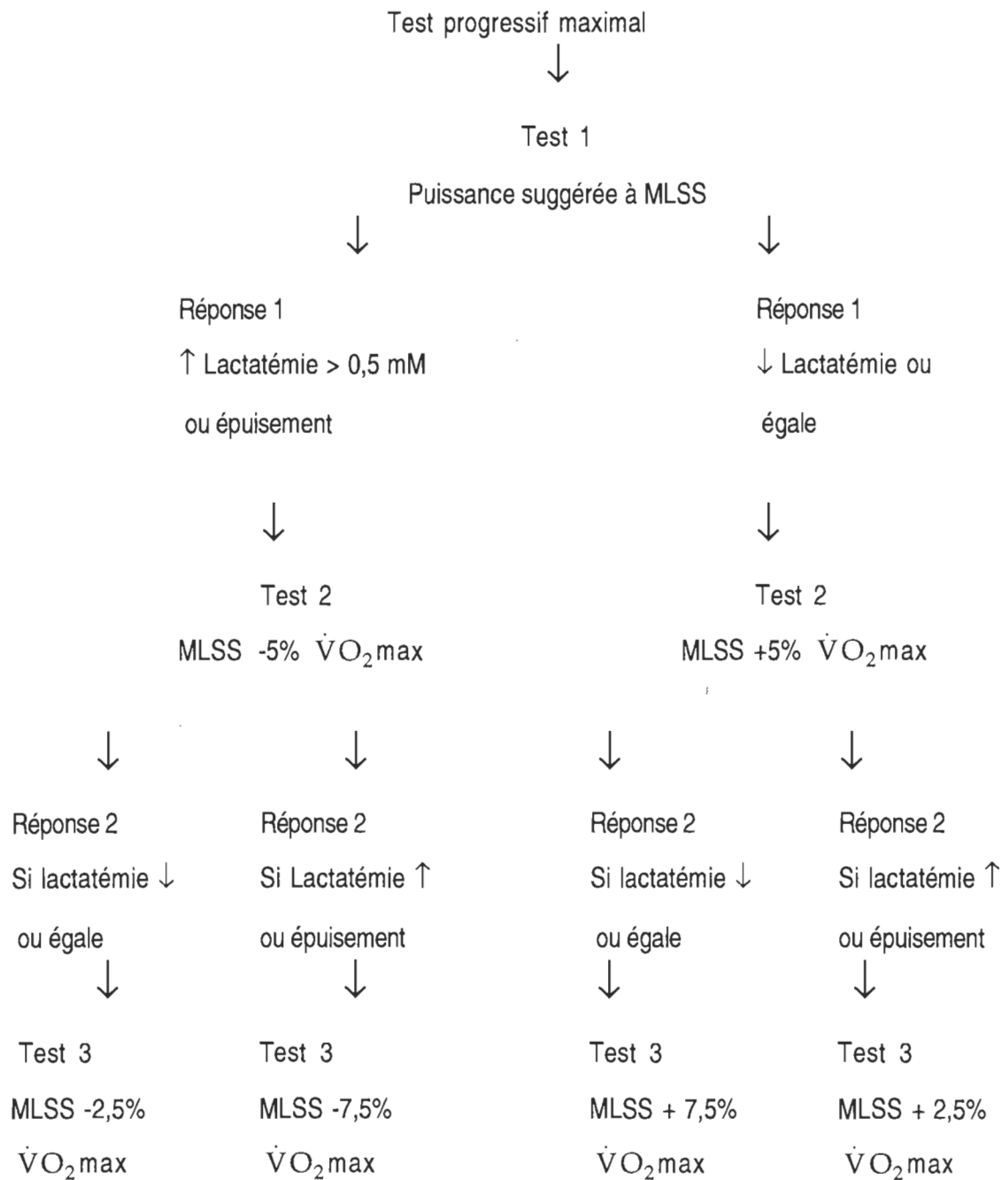


Figure 2. Algorithme de la procédure du IAT selon McLellan et Jacobs (1993).

par le test progressif. Alors, pour ces individus, le deuxième test a été réalisé à l'intensité $\text{MLSS} + 5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ et le troisième test à $\text{MLSS} + 2,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$, s'ils démontraient une hausse de lactatémie. Au contraire, s'ils démontraient une baisse ou un état stable de lactatémie au deuxième test, le troisième test s'exécutait à $\text{MLSS} + 7,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$, ce qu'aucun sujet n'a eu à faire. Les sept autres sujets, qui n'ont pu réussir un minimum de 30 minutes, ont dû faire leur deuxième test à $\text{MLSS} - 5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ de leur MLSS (IAT). Au dernier test, 3 sujets ont dû faire leur exercice à $\text{MLSS} - 7,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ et les 4 autres à $\text{MLSS} - 2,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ de leur MLSS . La conclusion est la suivante; aucun sujet n'a réussi à démontrer un état stable à $\text{MLSS} + 5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ et seulement 1 a réussi à $\text{MLSS} + 2,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$. En ce qui concerne ceux qui devaient exécuter leur test sous le MLSS , 4 ont réussi à rencontrer les critères d'atteinte du MLSS précédemment cités à $\text{MLSS} - 5\%$ et à $\text{MLSS} - 2,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$. Enfin, 2 sujets n'ont jamais rencontré les critères, même à $\text{MLSS} - 7,5\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ sous le MLSS .

L'estimation du MLSS à partir du test d'effort progressif, selon cette méthode, semble donc ne pas être valide car on surestime le MLSS chez 64% des sujets (McLellan et Jacobs 1993). Quels facteurs causeraient la surestimation du MLSS chez certains sujets à partir d'un test progressif maximal suivi d'une période de récupération? Une chose semble claire, plus le sujet récupère rapidement, c'est-à-dire qu'il élimine rapidement son lactate sanguin comme lors de la récupération active, plus la tangente touchera la courbe de lactate à un niveau élevé. Ce qui semble avoir pour conséquence de surestimer le MLSS . Alors, pourquoi n'utilise-t-on pas un repos passif? La littérature mentionne que le repos actif accentue l'élimination de l'acide lactique du muscle (Belcastro et Bonen 1975; 1976; McLellan et Skinner 1982). Lors de leurs travaux, McLellan et Jacobs (1993) ont utilisé le repos actif suite à un test progressif maximal, comme Urhausen et al. (1993) et Mader et al. (1976). Cependant, la concentration de lactate

décroît plus rapidement en récupération active qu'en récupération passive. Ainsi, le repos actif risque de faire surestimer le MLSS à cause du temps requis pour éliminer le lactate qui est plus court qu'en récupération passive. En fait, la droite horizontale qui relie la fin de l'exercice et la courbe de récupération sera différente, ce qui modifie l'angle et le contact de la tangente à la courbe d'exercice maximal. D'ailleurs, même McLellan, Cheung et Jacobs (1991) suggèrent d'utiliser un protocole qui implique un test maximum par paliers suivi d'une récupération passive pour des sujets entraînés.

La durée des paliers de 4 et 6 minutes est critiquée par Foxdal et al. (1996). Ceux-ci proposent une durée de 8 minutes plutôt que 4 ou 6 minutes, parce qu'il y a risque de surestimer l'état stable maximal (MLSS) lorsque la durée de chacun des paliers est trop courte. Il est possible que la diffusion du lactate musculaire vers le sang soit dépendante de la capacité de son transport à travers le sarcolemme (MacRae et al., 1992; Roth, 1990). Cela pourrait retarder le moment auquel le lactate peut atteindre le liquide interstitiel et les vaisseaux sanguins. Aussi, le lactate peut être éliminé par d'autres muscles actifs et inactifs, le coeur et d'autres organes, en fonction du degré d'entraînement (Brooks, 1986; Gertz et al. 1981; Jorfeldt et al. 1978; Richter et al. 1988; Stanley et al. 1985). Finalement, il y a un délai requis pour que le lactate du muscle se dilue dans le sang; ceci semble relié à la microcirculation (densité capillaire) dans les tissus musculaires (Foxdal et al. 1996; Holloszy et al. 1984; Jorfeldt et al. 1978).

Comparativement à McLellan et Jacobs (1993), Stegmann et Kindermann (1982) ont démontré, chez des athlètes bien entraînés, qu'il était possible de maintenir la puissance au MLSS pendant 50 minutes avec des concentrations d'acide lactique variant de 2 à 7 mM en état stable individuel. Puisque dans l'étude de McLellan et Jacobs (1993), seulement 4 sujets ont complété 30 minutes à leur MLSS, cela nous laisse croire que la durée d'exercice qu'on peut

maintenir au MLSS n'est pas encore bien connue. Par contre, Billat et al. (1994) ont réussi à maintenir les sujets à une lactatémie stable entre la vingtième et la soixantième minutes d'exercice à partir de leurs prédictions. La valeur moyenne de lactate lors du MLSS prédit pour leurs 4 sujets est de 3,9 mM et une étendue de 2,2 mM à 6,7 mM (Billat et al. 1994). Urhausen et al. (1993) ont obtenu une puissance moyenne de travail à IAT de 253 ± 42 W correspondant à 3.46 ± 0.66 mM de lactate sur 30 minutes d'effort continu.

Il est nécessaire de considérer le calibre des athlètes qui exécutent ces protocoles. Dans le cas de McLellan et Jacobs (1993), la moyenne des $\dot{V}O_2\text{max}$ était de $57,8 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Ce n'était probablement pas des athlètes de pointe, mais tout de même, ils étaient en bonne condition physique. Étaient-ils des cyclistes d'expérience? Urhausen et al. (1993), Billat et al. (1994) et Coyle et al. (1988) ont utilisé des athlètes qui avaient des $\dot{V}O_2\text{max}$ plus élevés, (respectivement $64,9 \pm 3,8$, 62 , $66,0 \pm 1,2 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ pour le groupe plus faible et $68,6 \pm 1,2 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ pour le groupe plus fort dans l'étude de Coyle et al. 1988).

Les critères d'évaluation de la concentration de lactate excédentaire pour déterminer si l'état stable est survenu (e.g. 0,5 mM) sont arbitraires. D'ailleurs, d'autres recherches ont utilisé de telles variations arbitraires de concentrations pour prédire l'atteinte ou non d'un état stable. Par exemple, Snyder et al. (1994) utilisent le critère arbitraire de 1 mM comme borne excédant l'état stable. Certains chercheurs utilisent une borne excédentaire arbitraire de 0,5 mM à 1,0 mM pour déterminer si l'état stable est obtenu (McLellan et Jacobs 1993, Snyder et al. 1989, Urhausen et al. 1993, Weltman 1995).

Problème proposé

Le premier problème est de déterminer une puissance d'effort au MLSS soutenable pendant 60 minutes sur vélo. Soixante minutes représente une durée référence d'effort en vélo, tel le record de l'heure. Des mesures d'état stable de lactatémie doivent se faire selon la spécificité du sport. Le patron du recrutement des fibres musculaires est spécifique au sport et à l'intensité demandée. Il n'est pas assuré que la spécificité ait été respectée dans toutes les études recensées (McLellan et Jacobs 1993). De plus la participation de sujets non cyclistes ou cyclistes peu expérimentés a pu avoir influencé les résultats des études antérieures.

Lorsqu'on demande à un sujet, peu entraîné en cyclisme, d'exécuter un exercice continu à une intensité à laquelle il n'a pas l'habitude de s'exercer, les résultats sont biaisés, parce que les muscles sont sollicités de façon sélective et relative au mouvement et à l'intensité. Normalement, un coureur cycliste est habitué au travail en intensité (e.g. fréquence de pédalage), il a une plus grande tolérance à la douleur. Il est possiblement plus efficace à haute et basse intensité. Si les sujets ne sont pas habitués à un exercice de cyclisme de haute intensité, ils risquent l'abandon prématuré, même si la concentration de lactate sanguin est encore stable.

L'état stable des paramètres physiologiques ne peut durer indéfiniment. Certains athlètes peuvent maintenir une puissance donnée pendant quelques minutes, voire une heure, alors que d'autres ne le peuvent que pour 45 minutes. Cette étude servira principalement à cibler les limites, les variations et la stabilité des paramètres physiologiques chez le cycliste.

Objectifs de recherche

Premier objectif

En effectuant des corrections à une méthode de détermination du MLSS, nous pourrions mieux déterminer le MLSS à partir d'un test progressif maximal. L'adaptation de la méthode d'estimation du MLSS se fera en allongeant la durée des paliers et en effectuant une récupération passive lors du test progressif maximal. Les sujets sélectionnés seront des cyclistes de compétition, afin de respecter le principe de spécificité. Ceci devrait permettre d'éviter la surestimation du MLSS.

Deuxième objectif

Nous croyons que d'autres variables comme le $\dot{V}O_2$ et la fréquence cardiaque pourraient varier significativement lors d'un test continu à MLSS, même lorsque l'acide lactique sanguin reste stable. Cette dérive physiologique se produirait à un temps critique qui est déterminé à partir d'analyses statistiques.

La durée et l'intensité des efforts en sport d'endurance sont limitées par un ensemble de facteurs métaboliques et cardiovasculaires. Notre hypothèse est qu'il existe un intervalle temporel critique dans lequel l'équilibre physiologique du cycliste se dégrade, malgré le maintien de la puissance constante. Cet intervalle varie d'un individu à l'autre. Aussi, il pourrait y avoir une dissociation dans le taux de dérive de chacun des indices que nous avons retenus (fréquence cardiaque, lactate sanguin et $\dot{V}O_2$).

La puissance critique a fait l'objet de plusieurs publications dans la littérature. Une définition de ce terme nécessite encore à ce jours des éclaircissements. En aucun cas notre recherche ne fait allusion à une puissance critique universelle, selon le modèle hyperbolique asymptotique ou exponentiel de Monod et Scherrer (1965) et Hill (1993).

CHAPITRE III

Méthodologie

Sujets

Douze sujets soit 11 hommes et une femme ont participé à l'étude. Les sujets devaient posséder un $\dot{V}O_2$ max de $60 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ou davantage. Les sujets étaient issus de différentes disciplines cyclistes d'endurance (vététistes, cyclistes sur route, duathlètes et triathlètes). Les sujets étaient tous des amateurs évoluant aux niveaux provincial, national ou international. La durée de l'expérimentation a été de 3 mois. Les athlètes ne devaient pas avoir fait d'entraînement intense 24 heures avant les tests pour assurer qu'ils avaient suffisamment récupéré de toute forme d'activité exigeante. Les mesures anthropométriques, tels le pourcentage de graisse à l'aide de la méthode de Jackson et Pollock (1977), la taille et le poids, ont été effectuées d'emblée, avant le début de la détermination du $\dot{V}O_2$ max (Tableau 1).

Procédure

Pour tous les tests, les sujets utilisaient leur propre vélo installé sur un simulateur de route (RacerMate, Computrainer Professional Model 8001, Seattle WA), calibré avant chaque test pour assurer une fidélité de la résistance d'un test à l'autre. Le calibrage consistait à échauffer le pneu, à rouler jusqu'à 40 km/h et à laisser la roue ralentir d'elle-même pour que le programme mesure la pression exercée par le frottement des pneus sur le rouleau du générateur, des roulements à bille et de la pression des pneus. Le calibrage devait être effectué

Tableau 1

Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des sujets.

Sujets	Âge	Taille (cm)	Poids (kg)	Masse grasse (%)	FC max (bpm)	$\dot{V}O_2$ max ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	P ($\dot{V}O_2$ max) (Watts)
1	28	166,5	69,6	6,2	194	74,8	420
2	39	163	69,9	12,7	171	62,5	340
3	22	186,5	78,8	5,7	195	67,6	460
4	25	172	72	4,4	183	64,7	420
5	31	171,5	70,7	9,2	199	61,4	380
6	46	171,3	77,5	12,8	177	52,5	340
7	25	168,5	71,6	7,4	187	59,0	340
8	23	178	66,6	3,9	182	60,9	380
9	25	163	61,4	4,4	205	70,5	380
10	21	173,5	66,5	4,7	195	64,6	420
11	21	171,5	65,5	6,4	191	72,3	460
12	26	162,5	53,4	**	183	55,6	260
Moy.	27,7	170,7	68,6	7,1	188,5	63,9	383
É.T.	7,6	6,9	6,8	3,18	9,8	6,7	57,7

autant de fois que nécessaire pour permettre aux résistances de frottement d'atteindre un équilibre de température. L'appareil CompuTrainer a été validé en le comparant à un ergocycle de marque Lode (Cane et al. 1996). La réponse métabolique de onze cyclistes triathlètes a été

comparée pour les deux instruments. L'analyse statistique ne révéla aucune différence ($p > 0.05$) pour la puissance en relation au $\dot{V}O_2$, de la VE, au QR, à la perception de l'effort et à la fréquence cardiaque. Ainsi, l'utilisation du CompuTrainer nous permettait d'utiliser les vélos des sujets, respectant ainsi leur position biomécanique usuelle. De plus, la duplication de cette position reflétait une réponse métabolique plus réaliste, plus proche du terrain, que sur un ergocycle de laboratoire (Cane et al. 1996).

Tests progressifs maximaux

La détermination du $\dot{V}O_2$ max a été faite selon un protocole triangulaire (Billat et al. 1994). Les paliers étaient progressifs avec une augmentation à toutes les 3 minutes d'une charge de travail de 40 watts, ce jusqu'à ce que le sujet ne soit plus capable de maintenir la cadence. Lors de la mesure du $\dot{V}O_2$ max par un test progressif maximal, les données physiologiques étaient enregistrées aux 30 secondes (Vacumed Vista Mini CPX, Ventura CA). L'appareil était calibré à chaque utilisation. Les critères d'atteinte du $\dot{V}O_2$ max ont été les suivants: un plateau du $\dot{V}O_2$ même si l'intensité augmente, un quotient d'échange respiratoire au dessus de 1,1 et une fréquence cardiaque au-dessus de 90 pourcent de la fréquence maximale estimé, 220 moins l'âge.

Le test suivant, un test progressif maximal, servait à prédire la puissance de travail au MLSS. Le test débutait à une puissance de 100 watts. Les paliers duraient 8 minutes (Foxdal et al., 1996) et augmentaient chacun de 30 watts (McLellan et al. 1993). Les prélèvements de lactate sanguin étaient effectués 30 secondes avant la fin des paliers, à l'aide de deux instruments (Accusport, Boehringer Mannheim) qui ont été préalablement calibrés à l'aide de

solutions de contrôle. Les mesures de lactate post-exercice ont été effectuées respectivement à 1, 3, 5 et 10 minutes (Foxdal et al., 1996). Dix sujets ont effectué ce test à deux reprises.

Repère 4 mM par interpolation linéaire inverse

Plusieurs recherches ont démontré qu'il existe des différences individuelles de 2,2 à 6,7 mM au seuil anaérobie individuel. Cependant, la moyenne de la lactatémie au MLSS (LAT) approchait 4 mM (Billat et al. 1994, Heck et al. 1985). Étant donné la probabilité plus élevée de prédire le MLSS nous avons donc introduit à l'intérieur de notre test le critère du 4 mM par interpolation linéaire inverse. Le calcul s'effectue en localisant la valeur de 4 mM entre deux paliers, celui générant moins que 4 mM de lactate et l'autre générant plus que 4 mM de lactate. Statistiquement, il est plus probable de trouver une lactatémie stable à une puissance d'effort correspondant à 4 mM. Par exemple, un sujet obtient à différents paliers progressifs de puissance, les valeurs de lactate suivantes: 100W: 2,5 mM; 160W: 1,9 mM; 190W: 1,9 mM; 220W: 2,4 mM; 250W: 2,4 mM; 280W: 3,7 mM; 310W: 5,1 mM; 340W: 8,6 mM.

Il faut localiser la puissance correspondant à 4 mM, situé ici entre 3,7 et 5,1 mM, pour les puissances respectives de 280 W et 310 W. Par interpolation linéaire inverse, il est possible de découvrir la puissance de travail à 4 mM.

$$WL4 = W_{-} + (W_{+} - W_{-}) \left[\frac{4 - L_{-}}{L_{+} - L_{-}} \right]$$

- où
- WL4 = puissance estimée à 4 mM de lactate.
 - L_{-} = concentration de lactate immédiatement inférieure à 4 mM.
 - W_{-} = puissance correspondante à la concentration inférieure.
 - L_{+} = concentration de lactate immédiatement supérieure à 4 mM.
 - W_{+} = puissance correspondante à la concentration supérieure.

$$\text{Exemple; } 280\text{W} + (310\text{W} - 280\text{W}) \left(\frac{4 - 3,7}{5,1 - 3,7} \right) = 286,43 \text{ Watts}$$

. Puisque le Computrainer était ajustable que par tranche de dix Watts, l'ajustement pour le test continu de 60 min (MLSS) s'effectuait à la dizaine de Watts la plus près. Par exemple, le calcul de l'interpolation donnait 286,43 Watts, le computrainer était ajusté à 290 Watts.

Tests continus.

Les sujets devaient exécuter un test continu de 60 minutes à partir des données recueillies lors des tests maximaux, à la puissance prédite de l'état stable MLSS, en mesurant le lactate, la perception de l'effort, la fréquence cardiaque, le $\dot{V}\text{CO}_2$, la ventilation minute, la fréquence respiratoire, le quotient d'échange respiratoire (QR), l'indice Borg, $\text{VE}/\dot{V}\text{CO}_2$ et $\text{VE}/\dot{V}\text{O}_2$ à toutes les 30 secondes. Le calibrage de l'appareil était effectué avant chaque test continu. Les sujets devaient boire entre 500 ml et 750 ml d'eau avant d'exécuter le test d'une heure, pour minimiser la dérive cardiaque causée par la hausse de la température corporelle et la perte d'eau par sudation.

Un deuxième test continu était ajusté à la puissance MLSS 5% en plus ou en moins selon la réponse de la lactatémie du premier test continu (Figure 2). Si le sujet présentait une lactatémie supérieure à $0,5 \pm 0,1$ mM, entre la cinquième et la soixantième minute, il exécutait le test suivant à -5 %, en arrondissant à la dizaine de Watts la plus proche. Si, au contraire, la lactatémie était à la baisse, le sujet devait exécuter le prochain test à + 5%, à la dizaine de Watts près.

Les sujets devaient exécuter un troisième test continu qui était ajusté selon la réponse de la lactatémie du test précédent. La puissance était ajustée à la puissance prédite de MLSS $\pm 2,5\%$ pour cibler l'intensité finale voulue. Une réponse négative de la lactatémie entraînait un test continu subséquent à une puissance plus élevée, alors qu'une réponse positive entraînait une baisse du travail à effectuer.

Puissance maximale soutenable (PMS 60)

Nous avons convenu que la PMS 60 serait la puissance de travail la plus élevée maintenue pendant 60 minutes obtenue à partir des trois tests continus. Par exemple, un sujet maintient 300 Watts sur une heure à son deuxième test et ne réussit pas à réaliser une heure à 310 Watts à son troisième test, alors la PMS 60 est de 300 Watts sur une heure.

Test de puissance maximale

Un test de puissance supramaximale servait à vérifier la capacité alactacide et la puissance lactacide en Watts sur 30 secondes, ainsi que des mesures de la lactatémie post-test à la cessation de l'exercice, à 3 minutes et à 8 minutes, pour vérifier la concentration maximale de lactate post exercice. Suite au calibrage du simulateur de route, le sujet avait droit à trois essais courts de 3 à 5 secondes entrecoupés d'un repos de plus de 2 minutes entre chaque essai. Le sujet était invité à choisir les plateaux et pignons qu'il jugeait adéquats pour combattre l'inertie du départ. Tous ont choisi le grand plateau. Le choix des pignons arrière variait selon les sujets. Le test était un parcours droit avec une légère pente de 0,8%. Le sujet devait regarder le moniteur vidéo où les instructions de départ étaient données. À l'inscription "GO", le sujet devait tout donner, en sprintant de la façon qu'il jugeait la plus efficace. Le sujet avait

droit de se lever debout et de changer de vitesse. Après 30 secondes, l'expérimentateur arrêta le chronomètre et récolta les données de distance(en milles), de puissance maximale et de puissance moyenne (Watts).

Course

Pour terminer l'expérience, les sujets devaient exécuter une course simulée sur RacerMate, Computrainer à l'aide d'un appareil Nintendo. Le trajet de la course était le même pour tout le monde, une simulation du circuit de Duathlon de Zofingen. Le trajet mesurait l'équivalent de 50 km pour les hommes et de 40 km pour la femme. Le sujet devait parcourir le trajet le plus rapidement possible. Les sujets n'étaient pas autorisés à voir la puissance en Watts qu'ils génèrent. Par contre, ils avaient comme feed-back la vitesse en milles à l'heure, la distance en milles, le temps écoulé, la position de leur concurrent simulé en pieds de distance, le profil du terrain et les niveaux de pentes en pourcentage. La puissance du concurrent simulé était ajustée au MLSS, plus 7 pourcent, afin de s'assurer que le défi soit suffisamment élevé pour ne pas que le cycliste ralentisse sous prétexte que le concurrent était battu. Les mesures suivantes ont été prises lors de la course: le temps, la puissance, la fréquence cardiaque et l'indice de Borg à tous les cinq milles. Une prise de lactate a été effectuée au 15^e mile (24 km), ce qui pour l'homme constituait la mi-parcours. La puissance a été enregistrée à 60 minutes pour comparer avec le MLSS. Lors de la récupération passive, des prélèvements de lactate ont été effectués à trois et vingt minutes.

Statistique

Les données sont présentées comme valeur moyenne et écart-type. Les différences entre les moyennes ont été déterminé par un analyse de variance à mesure répétées à deux dimensions. Pour vérifier la capacité du test-retest du test et sa relation entre les variables, nous avons calculé un coefficient de corrélation de Pearson. Pour tout les analyses statistiques, les différences furent considérées significative lorsque $p < 0,05$.

CHAPITRE IV

Résultats

Dans le présent chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats de l'étude et ce, en trois grands jalons. Dans un premier temps, les données de nos 12 cyclistes obtenues lors du test progressif maximal (TPM) sur vélo couplé à un ergomètre, exécuté deux fois, sont détaillées, nous permettant de vérifier la reproductibilité de différents indices physiologiques d'effort. Dans un deuxième temps, nous déterminons l'état stable maximal de lactatémie (MLSS) des cyclistes en repérant, à partir du TPM, la puissance de travail équivalant à 4 mM de lactate. Cette puissance de travail correspondant à 4 mM était soutenue pendant une heure. Subséquemment, la puissance de travail était réajustée, à la hausse ou à la baisse, pour assurer la présence d'une stabilité lactatémique. Enfin, troisièmement, nous mettons en oeuvre une procédure de détermination de la puissance maximale soutenable et nous en vérifions la portée.

Étape 1: Les tests progressifs maximaux

Les données de puissance et de lactatémie sont présentées au tableau 2. Dix sujets sur douze ont exécuté deux protocoles semblables afin de vérifier la reproductibilité, la validité et la fidélité du test progressif maximal (TPM). Le tableau 2 montre aussi la puissance estimée au MLSS comparée à la PMS 60. La puissance du dernier palier de 8 minutes complété au TPM est toujours plus élevée que la puissance à 4 mM et à PMS 60. La puissance maximale atteinte au test TPM est plus faible que la puissance atteinte au test de $\dot{V}O_2$ max. La lactatémie à la fin du dernier palier de 8 minutes complété (LA-Palier) au TPM a une corrélation

moyenne avec la lactatémie maximale obtenue à ce même test (LA-Max), soit $r = 0,59$. La puissance MLSS estimée au premier coup figure comme étant un estimateur fidèle de la PMS 60 sur une heure, avec une corrélation de 0,99 entre ces deux mesures. Six sujets ont complété les deux tests progressifs maximaux dans un intervalle d'un mois, nous permettant d'évaluer la fidélité intrasujet de la mesure de lactatémie au MLSS estimée par interpolation linéaire inverse. La corrélation test-retest obtenue a été de 0,96, suggérant un niveau de fidélité excellent (voir figures en annexe, A-3, A-5, A-6, A-8, A-9 et A-10). De plus, il n'y avait pas de différence significative entre les valeurs moyennes des MLSS déterminés par les premiers tests ($288,49 \pm 60,95$ Watts) et les seconds tests ($282,76 \pm 60,33$ Watts) (Tableau 3).

Étape 2: État stable maximal de lactatémie

Test continu 1

Pour faire suite au TPM, les sujets ont exécuté un test continu à la puissance de travail estimée par la méthode d'interpolation linéaire inverse basée sur le 4 mM de lactate. Les données de référence étant celles du TPM le plus rapproché. Le tableau 4 présente les puissances de travail que devaient maintenir les sujets au premier test continu. La puissance moyenne était de 285,8 Watts pendant une heure, variant de 190 à 340 Watts. Onze sujets sur douze ont réussi leur premier test; parmi ceux-ci, six étaient en état stable de lactatémie entre la cinquième et la soixantième minute.

La corrélation moyenne entre la lactatémie des deux tests progressifs maximaux (TPM) de tous les sujets était $\bar{r} = 0,962$, variant de $r = 0,834$ à $r = 0,995$ d'un sujet à l'autre. Deux sujets n'ont fait qu'un seul test, par défaut de disponibilité.

Tableau 2

Comparaison de la puissance à différents moments; à MLSS prédit par interpolation linéaire, résultat du calcul (4 mM), au palier le plus élevé complété (Palier) et au dernier palier atteint non complété (Max). Lactatémie au dernier palier complété (LA-Palier) et lactatémie maximale au palier maximal non complété (LA-Max). Puissance retenue comme étant le MLSS réelle et PMS 60..

Sujets	4 mM (Watts)	Palier (Watts)	Max (Watts)	LA-Palier (mM)	LA-Max (mM)	MLSS (Watts)	PMS 60 (Watts)
1	285	340	370	6,2	8,2	270	
2	247	280	310	6,4	9,6	250	250
3	342	400	430	8,4	10,7	340	360
4	307	340	370	11,9	11,3	310	310
5	304	310	340	4,3	10,1	300	300
6	229	280	310	10,0	11,0	220	230*
7	286	340	370	8,6	8,9	270	270
8	295	310	340	4,9	7,3	290	300
9	317	370	400	8,2	9,3	320	320**
10	283	340	340	6,9	6,9	280	280
11	334	400	430	9,2	13,1	310	330*
12	191	220	250	7,0	7,7	190	190
Moy	285	327,5	355	7,7	9,5	279,2	285,5
É-T	43,7	51,9	52	2,16	1,84	42,95	48,45

*Les sujets ont réussi les trois tests. **Le sujet n'a fait qu'un test.

Tableau 3

Comparaison entre les deux tests progressifs maximaux, le nombre de jours les séparant (Δ jours) et la différence de puissance (ΔP) entre le premier test et le second.

Sujet	Test 1 (Watts)	Test 2 (Watts)	Δ jours	ΔP (Watts)
3	366,17	342	9	-24,17
4	307,27	294	12	-13,27
6	224,5	205	19	-19,5
7	302,5	286,42	15	-16,08
9	294	316,92	4	+22,92
11	334	340	12	+6
12	190,97	195	26	+4,03
Moy	288,49	282,76	14,43	-5,72
É-T	60,95	60,33	7,09	17,07

Tableau 4

Puissance et lactatémie au test progressif maximal. Résultat de l'interpolation linéaire inverse (4 mM). Puissance de travail, ajustée à la dizaine de Watts près de l'estimation (Test 1). Concentration de lactate au palier précédant le 4 mM (Pré La 4) et lactatémie au palier post 4 mM (Post La 4). Réussite au premier essai du MLSS estimé selon les résultats des calculs, réussite (Oui) ou non réussite (Non).

Sujet	4 mM	Test 1	Pré La 4	Post La 4	Réussite
	(Watts)	(Watts)	(mM)	(mM)	Oui / Non
1	285	290	3,1	4,2	Oui
2	247	250	3,2	4,1	Oui
3	342	340	3,9	5,4	Oui
4	307	310	3,0	4,1	Oui
5	304	300	2,8	4,3	Oui
6	229	230	3,7	4,7	Oui
7	286	290	3,7	5,1	Non
8	295	300	3,1	4,9	Oui
9	317	320	3,7	5,0	Oui
10	283	280	3,7	6,6	Oui
11	334	330	3,2	4,2	Oui
12	191	190	3,9	7,0	Oui
Moy.	285	285,8	3,42	4,97	11 / 12
É-T	43,7	43,4	0,39	0,96	

Test continu 2

Suite au premier test continu, trois sujets (1, 6 et 11) ont exécuté le test suivant à -5% Watts parce qu'ils avaient une lactatémie excédant la limite arbitraire fixée à +0,05 mM. Le sujet 7 n'a pas réussi à passer à travers les soixante minutes du premier test continu MLSS. Les huit autres sujets (2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 et 12) ont dû effectuer leur test MLSS à + 5% Watts, parce qu'ils ont démontré une baisse ou une stabilité lactatémique entre la cinquième et la soixantième minute variant en moyenne de -0,3 mM. En excluant du groupe le sujet le plus âgé, la moyenne aurait été de 0,9 mM d'augmentation, puisque ce sujet a eu une augmentation de 4,7 mM. Ce dernier a obtenu la plus grande variation de lactate, passant de 5,0 mM à la cinquième minute à 9,7 mM à la soixantième minute.

Les quatre sujets (1, 6, 7, 11) qui devaient exécuter leur prochain test à -5% Watts de MLSS ont produit les résultats suivants. Le sujet 1 a eu une variation nulle, les sujet 6 et 11 ont obtenu respectivement une variation de +0,4 mM et de +0,6 mM, alors que le sujet 7 n'a pas réussi à terminer. Pour ce qui était des 8 sujets qui avaient démontré une baisse ou une stabilité en lactate, les résultats de leur test subséquent à +5% Watts sont les suivants; six n'ont pu terminer l'épreuve (sujets 2, 4, 5, 8, 10 et 12). Le sujet 3 a eu une augmentation de 1 mM de lactate et le sujet 9 n'a pas participé à l'épreuve. Ce dernier avait réussi le premier test avec des valeurs physiologiques élevées, en particulier une fréquence cardiaque à 93% de sa fréquence maximale, une VE de 130 litres/min (la plus élevée de tous les tests), une valeur numérique oscillant entre 20 et 19 de l'indice de Borg dans les dernières 10 min et un pourcentage élevé de la consommation d'oxygène (97,44% du $\dot{V}O_2$ max).

Test continu 3

Neuf sujets devaient exécuter leur troisième test à -2,5%Watts du test précédent. De ceux-ci, deux sujets n'étaient pas ajustables à -2,5% Watts (sujets 4 et 12). Le sujet neuf, voir explication au test deux, était celui dont les paramètres physiologiques étaient fort élevés. Il n'a pas participé au troisième test continu à cause de contraintes personnelles.

Parmi les six sujets restant à -2,5% Watts du test précédent qui n'avaient pas réussi le deuxième test, deux n'ont pas terminé l'épreuve de 60 min par abandon (sujets 3 et 5), deux ne l'ont pas faite (sujets 2 et 10) et le sujet huit a démontré une baisse en lactate de 1 mM. Le sujet 7 qui n'avait pas réussi les deux premiers tests MLSS a finalement terminé la troisième épreuve avec -0,3 mM de variation en lactate.

De ceux qui avaient réussi leur deuxième test (sujets 1, 6 et 11) sans hausse de lactate significative, les variations de lactate sont les suivantes; les sujets 1 et 11 ont eu un accroissement respectif de 1 mM et de 0,7 mM à leur troisième test +2,5% Watts du test précédent. Le sujet 6 a terminé l'épreuve avec une baisse de 0,1 mM.

Étape 3: Puissance maximale soutenable sur 60 min (PMS 60)

Ces essais et erreurs ont amené les sujets à effectuer l'exercice de 60 min à une puissance maximale soutenable. La variation des paramètres physiologiques au test PMS 60 est présentée au tableau 5. Les variations de données de la cinquième à la soixantième minute ont été étudiées. La moyenne des variations de la lactatémie était de +0,33 mM, ce qui n'était pas statistiquement significatif. L'augmentation de la fréquence cardiaque (ΔFC) est beaucoup

plus accentuée, en proportion, que celles des autres paramètres étudiés, $\Delta FC = 18,75 \pm 6,24$ bpm, et d'une étendue de 10,05 bpm à 31,71 bpm. La fréquence cardiaque mesurée à 5 min est en moyenne de $156,59 \pm 13,79$ bpm pour une étendue de 130,2 à 175 bpm, tandis que celle mesurée à la fin (60 min) est en moyenne de $175,48 \pm 11,83$ bpm pour une étendue de 155,7 à 189,95 bpm. La moyenne globale soutenue sur 60 minutes est de $167,02 \pm 11,8$ bpm pour une étendue de 147,29 à 182,86 bpm, alors que la médiane est de 169,98 bpm. Entre les cinquième et soixantième minutes, la fréquence cardiaque est de plus en plus élevée à mesure qu'on s'approche de la fin de l'exercice.

Tableau 5

Puissance maximale soutenable (PMS 60) estimée par le test progressif maximal (TPM).
Variation (Δ) des paramètres physiologiques pour chaque sujet entre les cinquième et soixantième minutes.

Sujets	PMS 60 (Watts)	Δ LA (mM)	Δ FC (Bpm)	Δ VO ₂ (Litres)	Δ VCO ₂ (Litres)	Δ VE (Litres)	Δ QR	Δ Borg
1	◇	0,8	23,99	0,435	0,387	22,607	14,09	3
2	250	0	17,85	0,349	0,12	21,736	18,29	7
3	360	1	14,59	0,697	0,511	29,243	16,61	5
4	310	-0,1	13,31	0,242	-0,047	11,468	12,02	2
5	300	-0,8	14,95	0,248	◇	◇	16	2
6	230	4,7	31,71	0,442	0,306	30,497	19,86	8
7	270	-0,3	20,9	0,3	0,154	6,384	6,25	1
8	300	-1	17,6	0,177	-0,011	12,768	11,67	7
9	320	0,6	22,63	0,495	0,145	26,642	17,22	8
10	280	-1,2	24,8	0,198	-0,024	9,219	9,88	2
11	330	1	12,65	0,239	0,166	11,948	9,89	5
12	190	-0,8	10,05	0,218	0,08	3,13	7,26	6
Moy.	285,8	0,33 α	18,75*	0,337	0,162	16,88**	13,25*	4,67*
É-T	48,45	1,55	6,24	0,154	0,176	9,583	4,43	2,57

* p < 0,0001 ** p < 0,0002 α p > 0.05 ◇ données manquantes

La figure 3 montre l'évolution moyenne de la lactatémie à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps. De la trentième à la quarantième minute, pour les deux cas, le lactate augmente pour finalement revenir à des valeurs avoisinant celle du départ. La lactatémie est plus élevée à PMS 60 qu'à MLSS, sans que cette différence ne soit toutefois significative. En fait, comme la figure le démontre, la variation à MLSS ou à PMS 60 de lactate n'excède pas 1 mM. La moyenne globale de lactatémie à MLSS était de $4,6 \pm 1,125$ mM (4,4 à 4,3 mM), alors qu'à PMS 60, elle était de $5,1 \pm 1,16$ mM (4,72 à 5,04) entre la cinquième et la soixantième minutes. Cette différence était non significative.

La figure 4 montre les variations de fréquence cardiaque à PMS 60 et à MLSS. À PMS 60, la dérive est significative à partir de la vingtième minute, alors qu'à MLSS elle était significative à la trentième minute. Entre la PMS 60 et MLSS, il n'y a aucune différence significative à un temps donné.

La figure 5 démontre la variation de la consommation d'oxygène en absolue à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps. À PMS 60, nous observons une différence significative de la vingtième à la soixantième minute, alors qu'à MLSS, nous n'observons une différence significative qu'à la cinquantième minute.

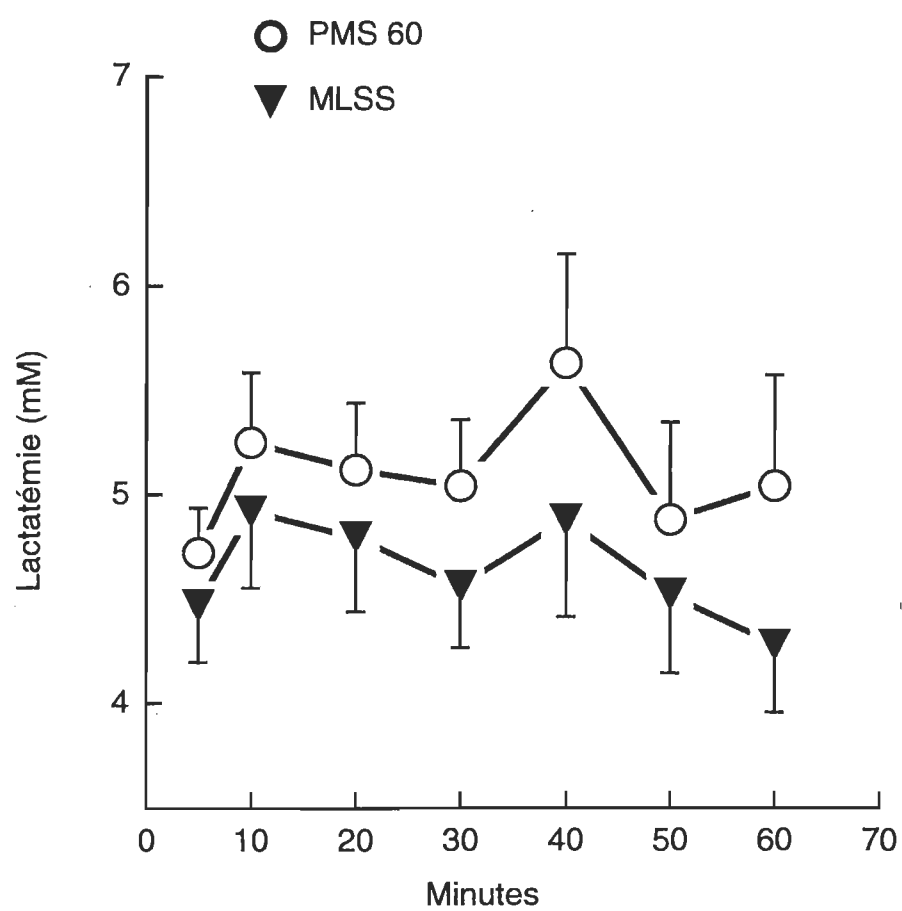


Figure 3. Variation de la lactatémie à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps.

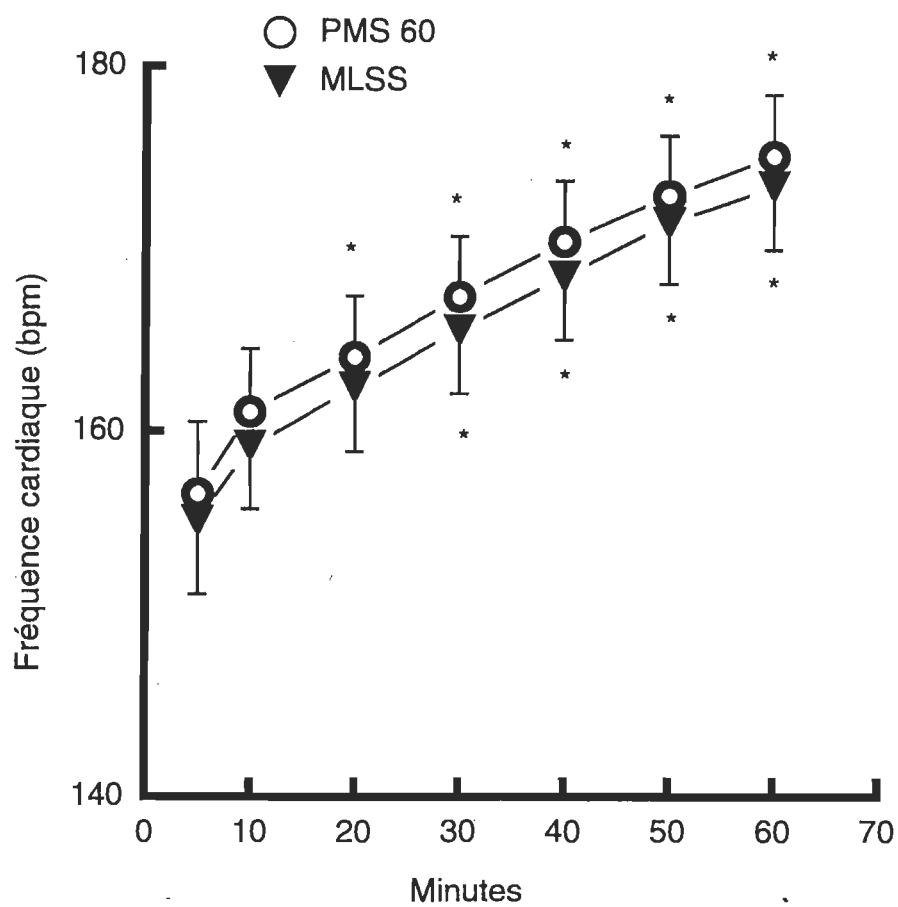


Figure 4. Variation de la fréquence cardiaque en fonction du temps à PMS 60 comparée au MLSS. * Différence significative par rapport à la cinquième minute.

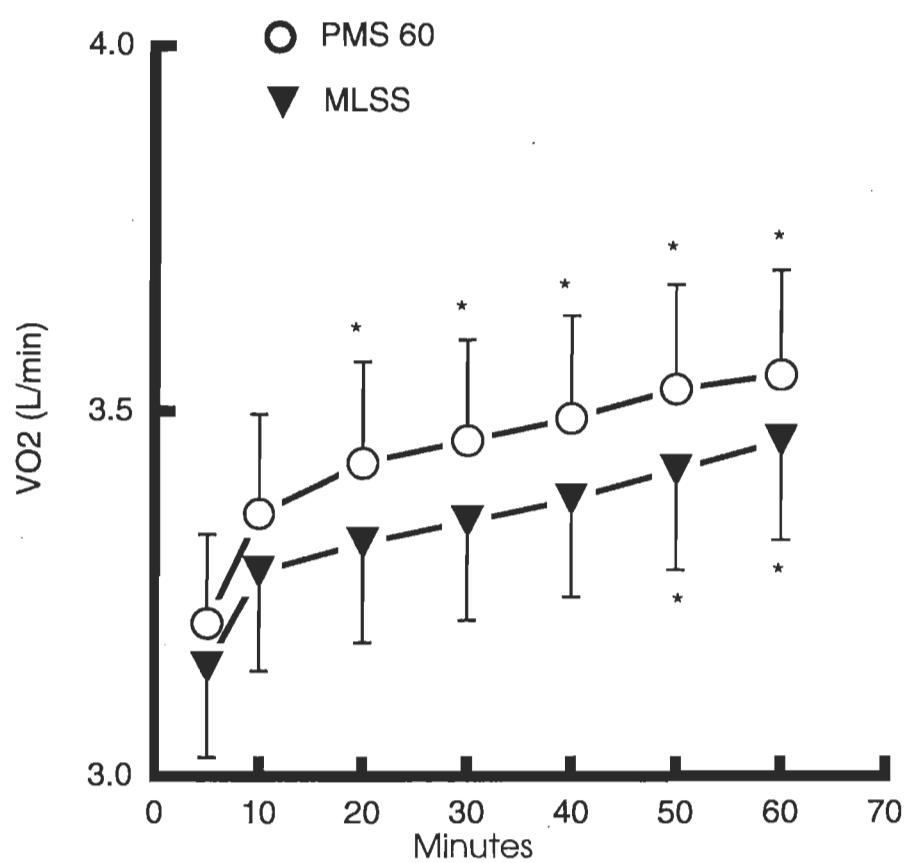


Figure 5. Consommation d'oxygène à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps. * Différence significative par rapport à la cinquième minute.

La figure 6 présente l'évolution de la consommation d'oxygène relative au poids des sujets à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps. À PMS 60, la consommation d'oxygène était significativement plus élevée à partir de la vingtième minute, alors qu'à MLSS elle n'était différente qu'à la cinquantième minute. Le départ était plutôt abrupt, la progression était à la hausse pour PMS 60, alors qu'à MLSS, la hausse était plus modérée au milieu de l'épreuve sans qu'il n'y ait de différences significatives entre les deux épreuves.

La figure 7 illustre la variation de la ventilation minute à PMS 60 et à MLSS. La variation était significative après trente minutes à PMS 60, alors qu'à MLSS elle ne l'était qu'à la soixantième minute. Les deux courbes étaient plus distantes l'une de l'autre en comparaison aux autres paramètres étudiés, sans toutefois démontrer des différences significatives l'une par rapport à l'autre à un temps donné. Les sujets ventilaient, en moyenne, 16,88 litres d'air à la minute de plus entre la cinquième et la soixantième minutes au test continu à PMS 60.

La figure 8 illustre la différence de $VE / \dot{V}CO_2$ entre les cinquième et soixantième minutes à PMS 60 et au MLSS. Les dix premières minutes des deux tests étaient sensiblement identiques. À PMS 60, la $VE / \dot{V}CO_2$ dérive significativement entre la vingtième et la soixantième minute, alors qu'à MLSS, la dérive n'est significative qu'à la fin de l'exercice. Il n'y avait pas de différence significative entre les deux tests à différents moments. Le $VE/\dot{V}CO_2$

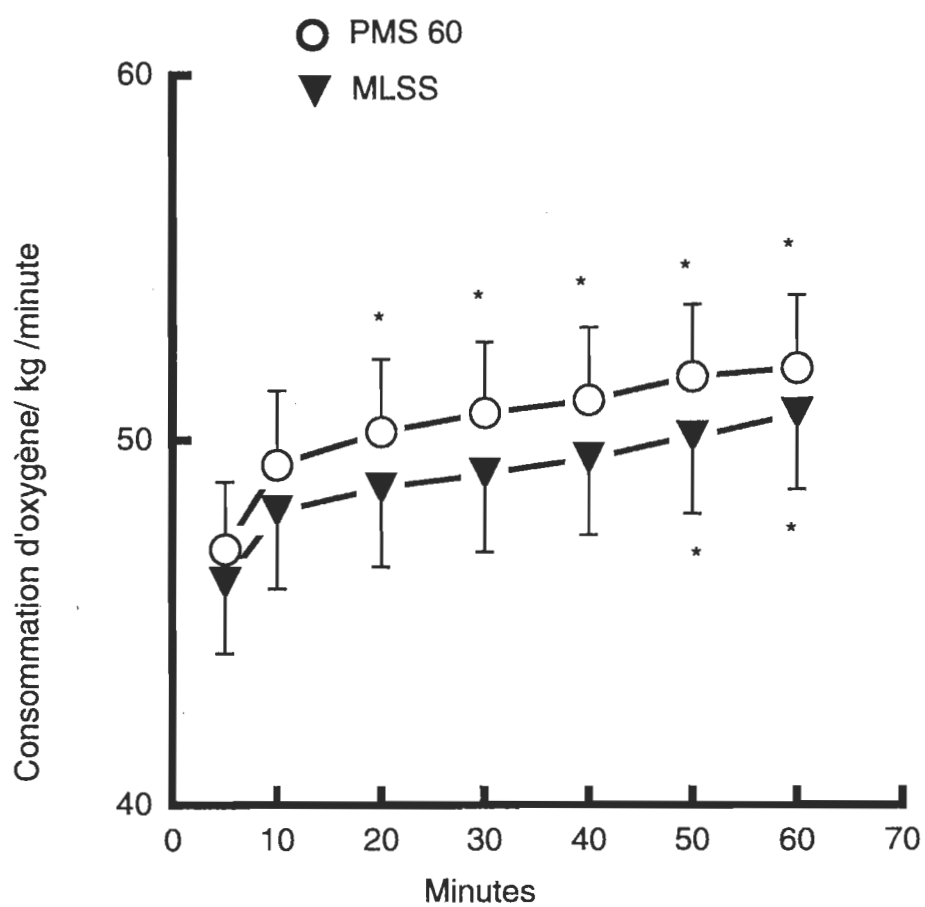


Figure 6. Variation de la consommation relative d'oxygène à puissance critique et à MLSS en fonction du temps. * Différence significative par rapport à la cinquième minute.

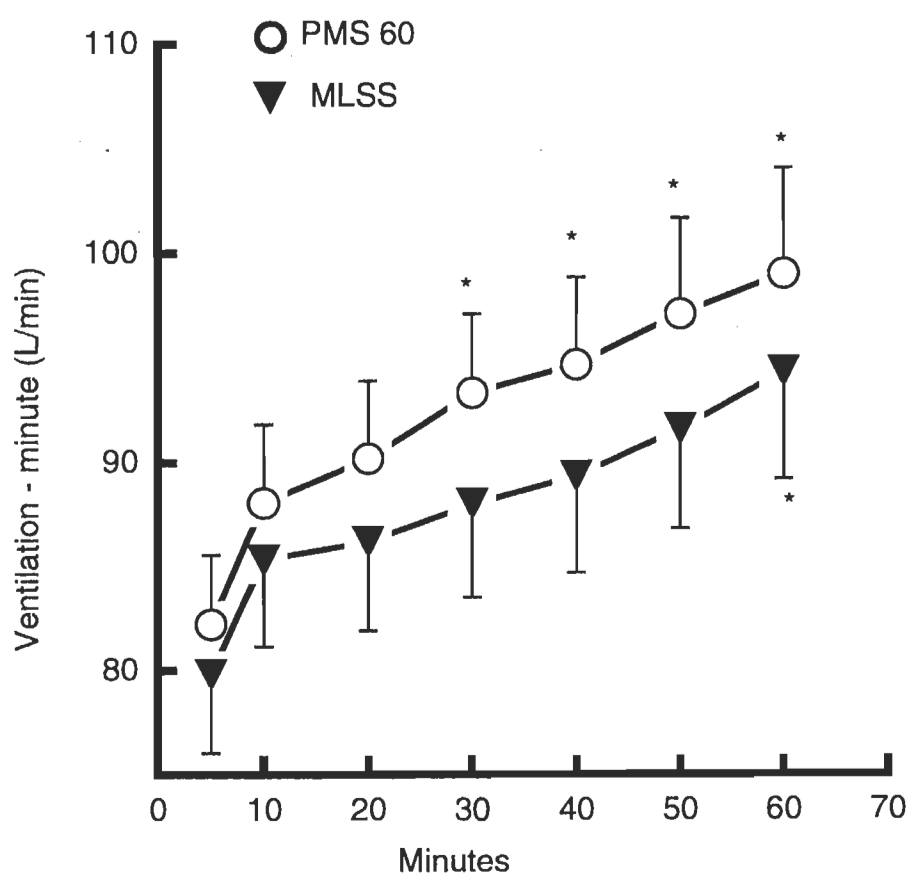


Figure 7 Évolution de la ventilation moyenne par minutes à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps. * Différence significative par rapport à la cinquième minute.

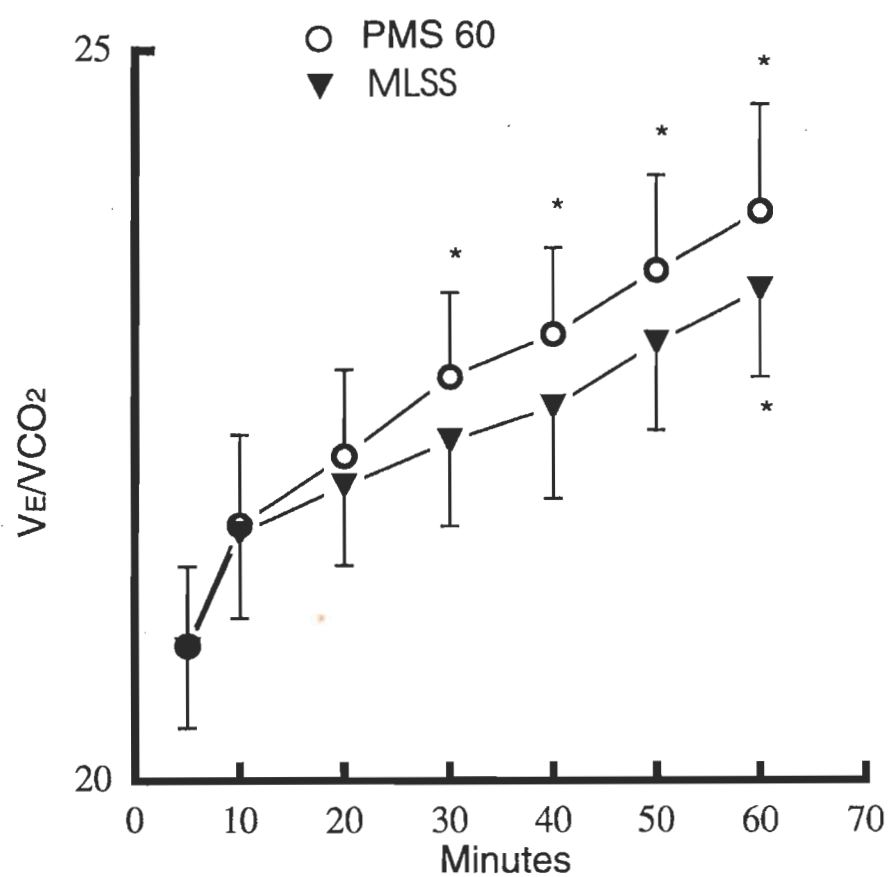


Figure 8. Variation de la $V_E / \dot{V}CO_2$ en fonction du temps à PMS 60 et à MLSS. *

Différence significative par rapport à la cinquième minute.

augmente d'un intervalle de temps à l'autre, passant de 20,92 à 23,9 de la cinquième à la soixantième minute à PMS 60.

La figure 9 montre la variation du quotient d'échange respiratoire entre la PMS 60 et le MLSS en fonction du temps. Le quotient d'échange respiratoire (QR) était décroissant tout au long de l'épreuve et ce d'un intervalle de temps à l'autre. À PMS 60, la baisse devient significative à partir de la quarantième minute, alors qu'à MLSS, la baisse était significative dès les premières vingt minutes. Toutefois, il n'y avait aucune différence entre les différents moments des deux tests.

La figure 10 illustre l'accroissement de l'indice de Borg entre les deux tests, à PMS 60 et à MLSS. À PMS 60, la hausse était plus hâtive qu'à MLSS, l'indice de Borg démontre une augmentation significative à partir de la trentième minute à PC et à la quarantième minute pour le MLSS. Par contre, il n'existe pas de différence significative entre les deux tests pour un temps donné.

La figure 11 montre l'évolution du volume de gaz carbonique expiré ($\dot{V}CO_2$) entre la PMS 60 et le MLSS en fonction du temps. Il n'y avait aucune différence significative d'une tranche de temps à l'autre et d'un test à l'autre. En fait, les courbes sont relativement à plat, affichant une hausse non significative lors des dix premières minutes pour ensuite se stabiliser jusqu'à la fin des épreuves.

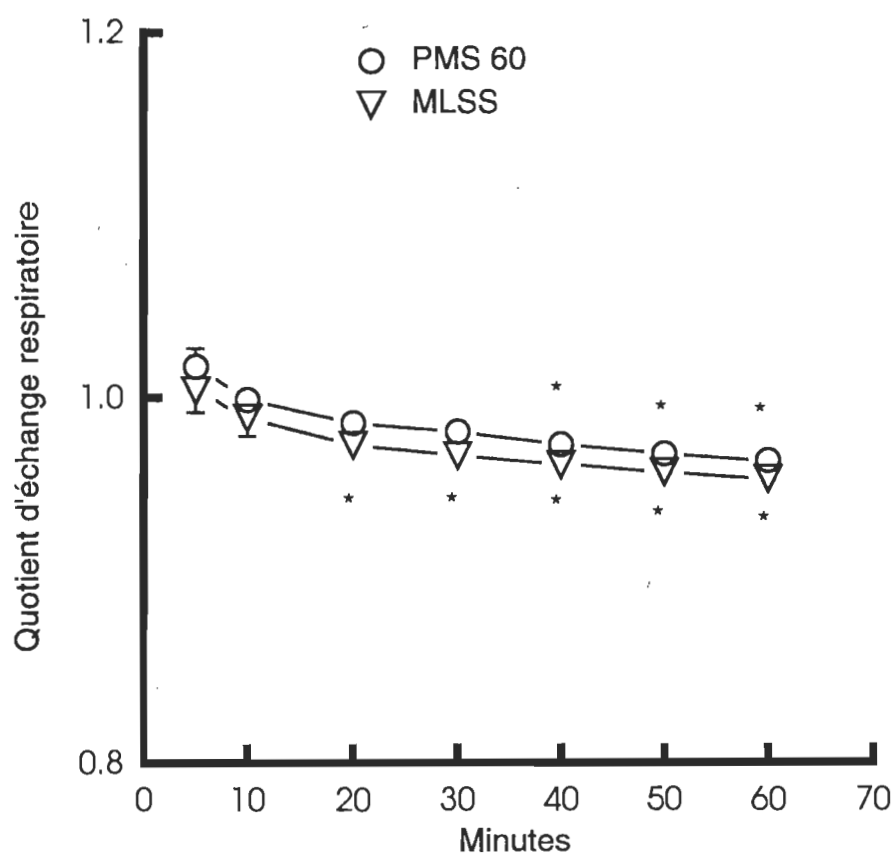


Figure 9. Ratio d'échange respiratoire à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps. * Différence significative par rapport à la cinquième minute.

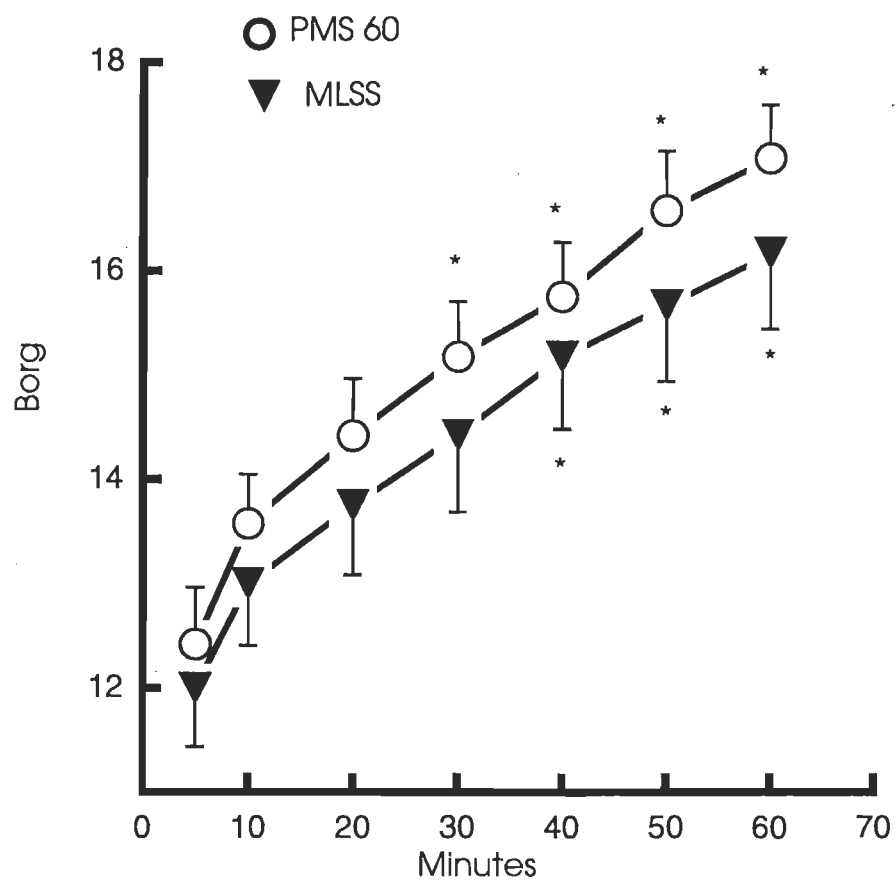


Figure 10. Indice de Borg à puissance critique et à MLSS en fonction du temps. * Différence significative par rapport à la cinquième minute.

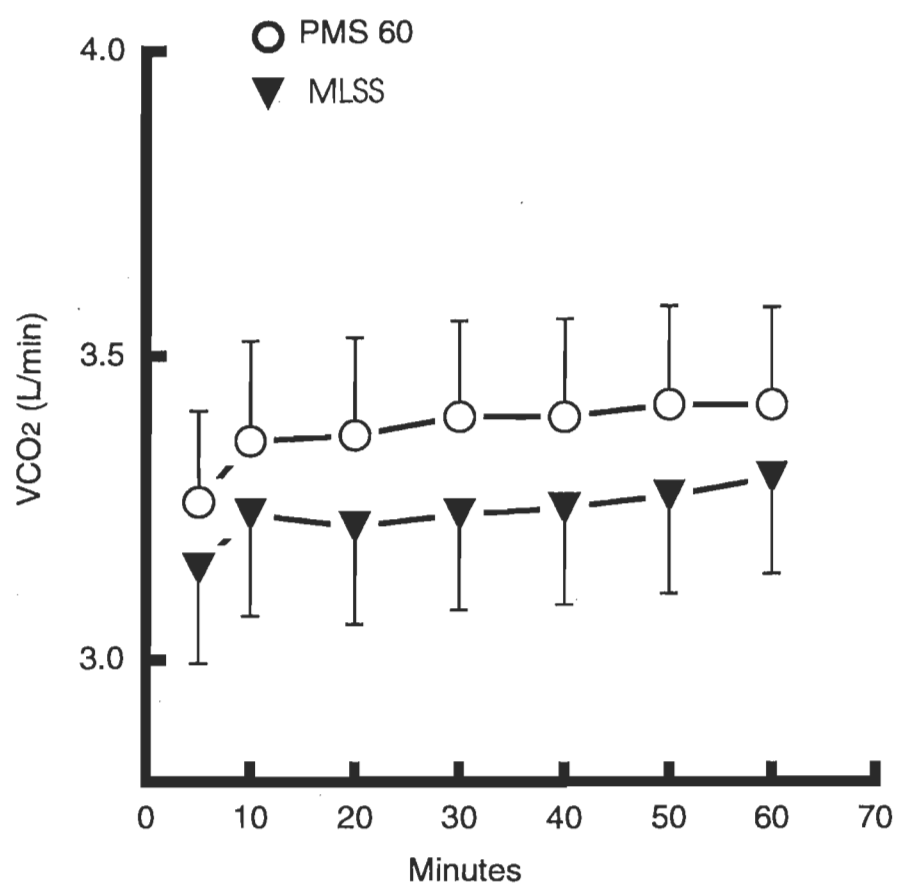


Figure 11. Variation de la $\dot{V}CO_2$ à PMS 60 et à MLSS en fonction du temps.

Test de puissance maximale

Nous avons soumis les sujets à un test qui témoigne de la capacité alactacide et de la puissance lactacide en Watts sur 30 secondes. À partir de ce test, nous avons corrélié les puissances enregistrées avec le PMS 60. Les sujets qui étaient en mesure d'effectuer un travail supramaximal élevé (la puissance instantanée maximale enregistrée) étaient en mesure de maintenir une puissance de travail moyenne élevée sur 30 s ($r = 0,97$). Ceux qui avaient une puissance de travail supramaximale élevée étaient en mesure d'obtenir une PMS 60 élevée ($r = 0,78$) (Tableau 6).

Courses simulées

Nous avons assujetti les sujets à une course simulée dans le but de vérifier si PMS 60 reflétait une puissance de travail difficilement reproductible sans notre présence régulatrice en laboratoire. Comme le témoigne le tableau 7, la puissance de travail à la course simulée après 60 min était en moyenne plus faible qu'à PMS 60, $277 \pm 47,8$ Watts contre $285,5 \pm 48,5$ Watts. La lactatémie était significativement plus élevée ($p < 0,05$) pendant la course qu'au test PMS 60, les concentrations moyennes respectives étaient de 6,7 mM versus 4,9 mM.

Pour appuyer notre recherche, nous avons vérifié la puissance de travail, la lactatémie, les fréquences cardiaques et l'indice de Borg (sur une échelle de vingt) sur une heure lors de cette course simulée. Les résultats de cette course nous démontrent que les sujets n'ont pu battre leurs PMS 60, et qu'en plus, ils avaient une lactatémie supérieure que lors de la PMS 60 (6,7 mM vs 4,9 mM), pour une puissance de travail inférieure (277W vs 285W). Lors de la course simulée, ils sont presque tous partis trop fort (résultat d'observation), dépassant leur PMS 60 au premier moment de la course, voulant suivre leurs concurrents simulés.

Tableau 6

Test de puissance supramaximale de 30 sec sur Computrainer. Mesures de la puissance max (Pointe), de la puissance moyenne (P-Moy), du rapport entre P-Moy et Pointe et de la lactatémie à 3 (LA 3), 8 (LA 8) minutes post-exercice et la lactatémie max atteinte au test progressif maximal (TPM La Max).

Sujets	Pointe (Watts)	P-Moy (Watts)	P/moy* (% Watts)	LA 3 (mM)	LA 8 (mM)	(TPM La Max) (mM)
1	1145	799	69,8	15,2	13,2	8,2
2	878	525	59,8	11,7	12,7	9,6
3	1439	961	66,8	14,6	13,5	10,7
4	1189	825	69,4	17,2	**	11,3
5	919	613	66,7	12,4	13,6	10,1
6	788	608	77,2	9,5	8,5	11
7	1283	900	70,1	12,1	13,2	8,9
8	995	638	64,1	15	13,4	7,3
9	320	DNS				
10	946	626	66,2	8,8	8,1	6,9
11	1068	756	70,8	12,7	15,7	13,1
12	707	458	64,8	9,8	9,6	7,7
Moy.	1032	700,8	67,9	12,6	12,2	9,52
É.T.	218,6	158,5	4,48	2,66	2,51	1,93

*Peak vs P-Moy; $r = 0,97$

** Donnée manquante

Tableau 7

Simulation d'une course de 50 km sur Computrainer. Mesure de la puissance après 60 min (P 60), de la lactatémie après 15 milles (LA 15), de la lactatémie moyenne à PMS 60 (LAPMS 60), de la différence de puissance en course par rapport à PMS 60 (Δ PMS 60) et de la puissance finale en Watts (PF).

Sujets	PMS 60 (Watts)	P60 (Watts)	PF (Watts)	LA15 (mM)	LAPMS 60 (mM)	Δ PMS 60 (Watts)
1	290	315	312	7,7	4,5	22*
2	250	224	DNF	3,9	5,1	DNF
3	360	319	310	7,8	5,4	-50
4	310	311	307	7,9	6,4	-3
5	300	294	288	8,9	3,5	-12
6	230	234	210	5,0	6,9	-20
7	270	285	276	4,3	3,8	6
8	300	284	277	6,2	4,8	-23
9	320	DNS				
10	280	DNF				
11	330	321	319	10,4	5,1	-11
12	190	181	166	5,2	3,9	-24**
Moy	285,5	276,8	274	6,7	4,9	-12,8

*La PMS 60 de ce sujet a été sous-estimée à cause d'une erreur de calcul. ** Ce sujet est de sexe féminin, nous avons diminué la course à 40 km. DNF = n'a pas été en mesure de terminer la course. DNS= n'a pas pris le départ.

CHAPITRE V

Discussion

Nous avons émis deux hypothèses; la première hypothèse, visait à améliorer la capacité de détermination du MLSS (IAT) à partir d'un test progressif. Notre approche expérimentale nous a permis d'améliorer la capacité prédictive d'un test progressif servant à vérifier la lactatémie maximale en état stable. Le choix des sujets, l'utilisation de leur propre vélo et l'allongement des paliers ont contribué à améliorer le taux de réussite au premier test continu d'une heure. À priori, nous avons vérifié la reproductibilité du test progressif avec une forte corrélation de $r = 0,96$. Par la suite, nous avons prédit une puissance de travail soutenable pendant une heure, correspondant au MLSS. Onze sujets sur douze ont été en mesure de terminer l'épreuve. En complément à cette recherche, nous avons découvert que l'état stable maximal de lactate (MLSS) est tout près d'une puissance de travail maximale que nous jugeons critique. En fait, la puissance de travail réalisable sur une heure était pratiquement identique pour le MLSS et la PMS 60 (279,2 W vs 285,8 W).

La deuxième hypothèse est que nous croyions que d'autres variables; $\dot{V}O_2$, fréquence cardiaque, VE, $\dot{V}CO_2$ et l'indice de Borg pourraient varier significativement lors d'un test continu à MLSS, même lorsque la lactatémie reste stable. Nous croyions aussi qu'il existe une séquence de dérive des variables physiologiques. Les résultats de la recherche démontrent qu'il existe effectivement un ordre de variation défini entre les variables étudiées au test de une heure.

Test de détermination du MLSS

L'intérêt de déterminer un MLSS pour l'entraînement, est de partager les différents exercices qu'un athlète devrait faire. Ce partage de temps à l'entraînement, en utilisant le MLSS, augmente la précision sur l'utilisation des différents systèmes de production d'énergie, en particulier, le système aérobie versus le système de la capacité anaérobie lactique. L'entraîneur pourrait quantifier, d'une année à l'autre, le temps passé sous le seuil et au dessus du seuil et faire des analyses de performance selon les variantes d'intensité qu'ils auraient utilisées. Ainsi, les athlètes obtiendraient des périodisations plus rationnelles et mieux équilibrées pour faire face aux exigences des compétitions et à la maturation sportive des athlètes.

Il ne nous a pas été possible de prédire le MLSS à l'aide de la méthode modifiée de McLellan et Jacobs (1993), parce que douze tests sur vingt-deux n'ont pas manifesté de hausses de lactate post-exercice. Lors des tests progressifs maximaux, la concentration plasmatique de lactate post-exercice aurait dû atteindre une valeur qui était supérieure au lactate de fin d'exercice pour qu'on puisse utiliser cette méthode. En utilisant des paliers de huit minutes, le lactate sanguin se stabilise, ce qui ne permet pas d'obtenir une augmentation aigue de lactate post exercice. Foxdal et al. (1996) ont démontré qu'à partir d'un exercice progressif à paliers plus courts que huit minutes, le lactate sanguin n'est pas stabilisé à la fin du palier. Il semble que la longueur des paliers de 8 minutes ait été responsable de l'absence d'augmentation de la lactatémie post-exercice et ait rendu inutilisable le modèle modifié de détermination du MLSS de McLellan et Jacobs (1993). Étant donné qu'il faut 8 minutes au lactate pour atteindre une stabilité entre le lactate musculaire et le plasma, il est probable que des paliers de 4 minutes agissent à retardement sur la concentration plasmatique de lactate. Ces paliers plus courts auraient tendance à se répercuter sur le prochain palier plutôt que de vraiment représenter la

concentration plasmatique d'acide lactique à ce palier. Ceci favorise une surestimation de la charge de travail prédite. Cette tendance s'expliquerait par le fait que la libération du lactate, en provenance du muscle vers le sang, serait dépendante de la capacité des transporteurs de lactate du sarcolemme musculaire (Juel, Kristiansen, Pilegaard, Wojtaszewski, Richter, 1994; McDermott et Bonen, 1993; Roth et Brooks, 1990). Cette dépendance pourrait possiblement causer un délai de temps en présentant une barrière, qui empêcherait le lactate d'atteindre le liquide interstitiel et les vaisseaux sanguins (Juel et al. 1994). L'effet de dilution du lactate musculaire est dépendant du temps d'entrée dans le sang, qui est aussi en relation avec la microcirculation du sang à travers les tissus musculaires actifs et la densité capillaire (Holloszy et Coyle, 1984; Jorfeldt, Juhlin-Dannfelt, Karlsson, 1978). C'est pourquoi, dans l'étude de McLellan et Jacobs (1993) la concentration plasmatique de lactate, en utilisant des paliers de quatre minutes, continue d'augmenter en récupération. De plus, il est évident que la capacité d'élimination du lactate dans les muscles actifs et inactifs, du coeur et des autres organes serait une autre variable impliquée (Brooks 1986; Foxdal 1996).

Les deux tests progressifs maximaux ont démontré une bonne reproductibilité. Cette fidélité du TPM est démontrée par des corrélations de valeurs de lactate test-retest variant de 0,834 à 0,995 selon les sujets. La corrélation la plus basse ($r = 0,834$) qui comparait les deux tests TPM semble causée par le délai de 56 jours séparant les deux tests chez un des sujets. La moyenne des corrélations était de $r = 0,962$. En excluant ce sujet nous obtenons une corrélation de $r = 0,98$.

Le test de détermination du MLSS (le TPM) a une capacité élevée de prédire le MLSS. Onze sujets sur douze ont réussi à performer durant 60 min à la puissance prédite par ce test avec des valeurs physiologiques élevées, dès le premier essai. Ce premier ciblage ne veut pas

nécessairement dire que la lactatémie était stable (MLSS) ou que nous avons obtenu une PMS 60. Pour affirmer que nous avons eu un état stable de lactatémie, nous avons effectué d'autres tests subséquents afin de valider ce test, comme la méthodologie le démontre précédemment. C'est avec ces autres tests continus que nous avons ciblé la PMS 60. La puissance de travail prédite par le TPM s'avère très proche de la puissance maximale que les athlètes pouvaient soutenir sur une heure ($r = 0,99$).

Concentration sanguine de lactate à MLSS.

La deuxième raison pour laquelle nous croyons que le test a eu une bonne capacité de prédiction, est l'utilisation du 4 mM comme point de mire. L'étude de Heck et al. (1985) suggérait 4 mM comme la concentration lactique associée au seuil anaérobie. Toutefois, comme bien des études l'ont démontré (Billat et al. 1994; McLellan et Jacobs 1993; Urhausen et al. 1993), le 4 mM n'est qu'une moyenne de la lactatémie à l'état stable maximal de lactate. Nous avons donc utilisé le 4 mM comme étant un point de repère servant à découvrir les puissances de travail pré et post 4 mM, sachant les charges de travail au MLSS groupées autour du 4 mM. À partir de la puissance de travail des paliers pré et post 4 mM, nous avons estimé le MLSS à partir d'une interpolation linéaire inverse. Cet estimé de la puissance de travail à 4 mM n'était que théorique, puisque nous avons trouvé une lactatémie moyenne de $4,6 \pm 1,3$ mM lors de l'exercice continu à MLSS. La plupart des recherches sur le "seuil anaérobie", y compris la nôtre, s'entendent pour dire qu'il y a des différences individuelles de lactatémie en état stable (Billat 1994). Nous observons sensiblement les mêmes niveaux de lactatémie, c'est à dire une étendue de 3,3 à 7 mM pour une moyenne de $4,6 \pm 1,3$ mM, Stegmann et Kindermann (1982) ont des valeurs de concentration lactique de 2 à 7 mM, alors que Heck et al. (1985) obtiennent une étendue de 3 à 5,5 mM à MLSS.

Stegmann et Kindermann (1982) ont démontré qu'il est possible de maintenir un effort de travail continu sur ergocycle pendant 40 à 50 min à des concentrations de lactate plasmatique de 4 à 5 mM, ce qui est semblable à ce que nous avons observé sur 60 minutes. D'autre part, notre étude sur la PMS 60 nous confirme qu'il est effectivement possible de maintenir sur 60 min une lactatémie de $5,1 \pm 1,16$ mM de moyenne, avec une étendue de 3,79 à 6,96 mM pour 12 sujets pendant une heure.

Par contre, Oyono-Enguelle et al. (1990) ont observé que les sujets qui ont effectués un test continu sur ergocycle à une puissance de travail associée à 4 mM n'ont pas été en mesure de compléter plus de trente minutes à cette puissance. La moyenne des sujets ont complété 25 minutes et la lactatémie moyenne à l'épuisement était de 7,0 mM. Cette étude a utilisé des coureurs à pied, dont trois coureurs de demi-fond sur cinq sujets pour une épreuve sur vélo, qui n'est pas spécifique, puisque le patron de recrutement des fibres musculaires n'est pas le même sur vélo qu'en course. Puisque que c'était des coureurs de demi-fond, la contribution énergétique et les types de fibres musculaires recrutés risquent d'être différents en pourcentage de ceux des cyclistes d'expérience. Par contre, il existe une similitude avec notre étude, les sujets étaient à 80,8% de leur $\dot{V}O_2$ max entre 15 et 30 minutes d'exercice continu à MLSS.

Mognoni et al. (1990) ont étudié la variation de la fréquence cardiaque et de la $\dot{V}O_2$ lors d'un travail continu à une puissance de travail déterminée à une lactatémie de 4 mM lors d'un test progressif par palier de 30 Watts à toutes les quatre minutes. Les 34 sujets, impliqués dans des sports à caractère récréatif, devaient exécuter le test continu d'une durée cible d'une heure. Après chaque tranche de cinq minutes, les expérimentateurs demandaient aux sujets s'ils étaient en mesure de poursuivre pour cinq minutes additionnelles. Ceux qui réussissaient à

maintenir la charge jusqu'à 60 minutes, la durée cible, étaient sollicités pour essayer d'autres tranches de cinq minutes, et ce, jusqu'à épuisement. Suite à ce test, les sujets étaient divisés en trois groupes; ceux qui n'ont pu réussir 60 minutes ($n = 20$), ceux qui ont réussi 60 minutes ($n = 6$) et ceux qui ont réussi plus de 60 minutes ($n = 8$). Le principal résultat de leur recherche est le suivant, le groupe qui a réussi soixante minutes avait une lactatémie finale de 4,3 mM. Cette valeur était exactement comme celle de Heck et al. (1988), et très près de 4,02 mM, une autre valeur trouvée par le groupe de Heck et al. (1985). Ces auteurs considèrent les résultats comme une preuve de la validité du choix de 4 mM pour cibler le MLSS. Cependant, de telles conclusions sont seulement applicables à une analyse de groupe, puisque chez 31,6% des sujets ayant complété 60 min, le MLSS (maximal lactate steady state) variait de plus de ± 1 mM, à partir de la moyenne. Ainsi, le critère de 4 mM, utilisé avec un protocole progressif ayant des paliers de trois ou quatre minutes n'est pas valide pour inférer sur la réponse physiologique pendant un test continu en état stable d'un seul sujet.

Mognoni et al. (1990) ont aussi observé une faible corrélation entre la lactatémie à puissance stable et la lactatémie obtenue pendant un test progressif à la même vitesse de course qu'à puissance stable. Paradoxalement, il s'ensuit que la vitesse au seuil pendant le test progressif est indépendante de la vitesse du test progressif qui correspond à la lactatémie du test continu stable. En fait, nos propres données concordent sur ce point: nous avons aussi observé une dissociation de lactatémie entre les deux tests, le test progressif et le MLSS pour la même puissance. À 4 mM, nous prédisions une puissance de travail de $284,91 \pm 45,87$ Watts ($n = 11$). À cette même puissance, lors du test continu d'une heure, nous avons obtenu une lactatémie moyenne de $5,06 \pm 1,2$ mM à $284,55 \pm 45,25$ Watts.

Nos résultats suggèrent que le test de prédiction n'a plus besoin d'être maximal, puisque tout ce que nous avons maintenant besoin, c'est la puissance et la lactatémie au palier précédant le 4 mM et la même chose pour le palier suivant le 4 mM pour effectuer l'interpolation. Les autres méthodes de détermination du MLSS sont souvent maximales et nécessitent des prélèvements sanguin post-test demandant beaucoup de dextérité et d'expérience. Maintenant, cette étude nous a permis d'élaborer un test qui est plus facile à administrer, moins coûteux, demandant moins de personnel et beaucoup moins exigeant pour le sujet. Les athlètes peuvent ainsi être évalués à plusieurs occasions durant la saison d'entraînement sans risquer l'épuisement des ressources physiologiques utiles en compétition.

Capacité de détermination de la PMS 60.

Pour déterminer la puissance maximale soutenable sur 60 min (PMS 60), nous avons choisi le test continu le plus fort obtenu à partir de nos essais et erreurs à une intensité immédiatement inférieure à celle causant un abandon avant 60 min. En comparaison au MLSS, la PMS 60 était 2,4% plus élevée en puissance de travail, pour une étendue variant de 0 à 6,5%. En fait, la PMS 60 était identique au MLSS pour sept sujets sur onze. Dans la plupart des études sur la puissance soutenable on n'a rarement étudié des durées d'effort à épuisement dépassant les 40 minutes (Housh et al. 1989; Jenkins et Quingley 1990; McLellan et Cheung 1992; Overend et al. 1992; Poole et al. 1988). Certaines études ont exigé des sujets de s'exercer le plus longtemps possible ou d'arrêter à 90 min (Housh et al. 1991; Scarborough et al. 1991). Les temps d'endurance les plus longs étaient en moyenne 43 min (Housh et al. 1991) et 51 min (Scarborough et al. 1991) à leur puissance critique estimée à leur première tentative. En répétant la première tentative, les sujets ont été en mesure d'améliorer leurs temps, à une moyenne de 51 min (Housh et al. 1991) et 65 min (Scarborough et al. 1991). En fait, la puissance

critique serait l'ajustement de la limite supérieure d'une charge de travail, pour une durée prolongée, qui en théorie peut être maintenue indéfiniment (Morton 1996). En réalité, on sait très bien qu'il existe une limite de temps pour toute intensité de travail, puisque le corps humain a ses limites physiologiques et psychologiques, particulièrement en ce qui a trait à la fatigue et à la perception d'effort. Nous suggérons plutôt de développer un modèle prédictif de la puissance critique qui tienne compte d'une durée de temps fixe, telle une heure, plutôt que d'essayer de prédire des durées maximales à une intensité pré-établie.

Housh et al. (1989) ont utilisé le modèle de Monod et Scherrer (1965) avec quatorze sujets et ils ont obtenu une durée de travail moyenne de 33 minutes pour une étendue de 18 à 60 minutes. Ces chercheurs ont utilisé une courbe d'analyse de puissance pour démontrer que la puissance critique surestime de 17% la puissance de travail qui pourrait être maintenue sur une heure. Jenkins et Quigley (1990) ont observé que le calcul de la puissance critique surestimait de sept pourcent la puissance de travail représentant un état stable de lactatémie pour six des huit cyclistes entraînés. Notre méthode nous a permis de ne pas trop surestimer la PMS 60 parce qu'à priori, nous ciblions le MLSS sur 60 minutes.

Évolution des variables physiologiques

La variation de la fréquence cardiaque durant les épreuves continues n'est pas négligeable. La moyenne globale de la fréquence cardiaque soutenue sur 60 minutes à MLSS était de $164,76 \pm 11,92$ bpm avec une étendue de 142,66 à 182,86 bpm, alors qu'à PMS 60 elle était de $167,02 \pm 11,8$ bpm pour une étendue de 147,29 à 182,86 bpm. Les sujets ont subi une augmentation moyenne de $18,15 \pm 6,03$ bpm à MLSS et de $18,75 \pm 6,24$ bpm à PMS 60. Entre la cinquième et la soixantième minute, la fréquence cardiaque est de plus en plus élevée à mesure

qu'on s'approche de la fin de l'exercice. Comme on pouvait s'y attendre l'augmentation de la fréquence cardiaque a été plus importante lors de l'exercice continu à PMS 60 qu'à MLSS, puisque la PMS 60 a été réalisée à une charge de travail plus élevée.

À une puissance constante, la fréquence cardiaque augmente significativement dans le temps (Ekelund 1967; Trudeau et al. 1997; Urhausen 1993). Cette réponse fait partie de ce que Ekelund a baptisé la dérive cardio-vasculaire (Ekelund 1967). Cette dérive est en fait une dérive physiologique aussi caractérisée par une augmentation de la lactatémie, de la $\dot{V}O_2$, et de la catécholaminémie (Ekelund 1967; Galbo et al. 1975; Trudeau et al. 1997).

Il a été suggéré que la dérive cardiovasculaire soit surtout la conséquence des exigences de la thermorégulation entraînant une augmentation de la fraction du débit cardiaque dirigée à la peau, une baisse du retour veineux et une augmentation de la fréquence cardiaque (Rowell 1993). L'augmentation de la fréquence cardiaque à l'exercice continu ne s'explique pas seulement par les exigences de la thermorégulation, puisqu'une étude de Hamilton et al. (1991) a observé des dérives cardiaques de 10 pourcent lors d'un exercice de 2 heures à 70 % du $\dot{V}O_{2\max}$ sans remplacement de fluide. Par contre, après une heure d'exercice, il n'y avait pas de différence significative entre ceux qui étaient abreuvés et ceux qui ne l'étaient pas. Notre étude démontre une variation de la fréquence cardiaque de plus de 10% sur seulement une heure. Cette dérive cardiovasculaire à PMS 60 n'était pas exclusivement l'effet de la thermorégulation, d'autres facteurs physiologiques doivent influencer cet état de fatigue, qui se traduit par une augmentation de la fréquence cardiaque. Un autre facteur important à considérer est la variation de la commande centrale. À mesure que l'exercice continu se poursuit, l'organisme (physiologiquement et psychologiquement) ne ressent plus l'effort de la même façon qu'au début. La figure 10 démontre une perception de l'effort significativement plus

élevée à 30 minutes pour la PMS 60 et à 40 minute pour le MLSS, malgré une puissance stable. Pour un exercice d'intensité donnée, la commande centrale augmente tel que révélé par l'activation progressive du système nerveux sympathique (Lind 1983). Il a été suggéré que la perception de l'effort du sujet soit associé aux changements cardiovasculaires observé à l'exercice sous-maximal (Freund et al. 1979). Nous observons une corrélation de $r = 0,60$ entre le pourcentage moyen d'utilisation de la fréquence cardiaque maximale et l'indice de Borg à MLSS. Cette comparaison significative suggère que plus le pourcentage d'utilisation de la fréquence cardiaque est élevé, plus l'indice de Borg est élevé. L'indice de Borg est lui même indice de la perception de l'effort et possiblement de la composante psychologique de la commande centrale. Aussi, il n'y a pas de relation significative entre la variation de la fréquence cardiaque et la $\dot{V}O_2\text{max}$ ($r = -0,06$), ni entre la fréquence cardiaque et le pourcentage d'utilisation de la $\dot{V}O_2\text{max}$ ($r = 0,09$) à PMS 60. Ceci suggère que l'importance de la dérive cardiaque ne soit pas reliée à la condition physique.

A PMS 60, la $\dot{V}O_2$ relative et absolue varient significativement après vingt minutes alors que la $\dot{V}CO_2$ ne varie pas significativement tout au long de l'épreuve. Il en était de même pour la fréquence cardiaque, la variation significative était visible à partir de la vingtième minute, comme la $\dot{V}O_2$. En fait cela semble tout à fait normal, puisque qu'une demande accrue en oxygène des muscles squelettiques nécessite un apport d'oxygène proportionnel. Pour combler la demande en oxygène, la pompe cardiaque doit fournir plus de sang oxygéné, ce qui est réalisé partiellement en augmentant la fréquence des battements cardiaques. Pour fournir plus d'oxygène au muscle, il faut aussi véhiculer plus d'air vers les alvéoles et ventiler plus, pour satisfaire la demande en oxygène. La ventilation minute à PMS 60 était significative à partir de la trentième minute, variant de 82,2 à 99 litres minute.

Coyle et al. (1988) ont démontré qu'il était possible de maintenir des athlètes ayant un $\dot{V}O_2$ max moyen de $68,6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ pendant une moyenne de 61 minutes à 88% de leur $\dot{V}O_2$ max. Notre étude n'obtient pas les mêmes résultats, puisqu'un seul sujet a réussi à maintenir un pourcentage du $\dot{V}O_2$ max aussi élevé que 88% sur une heure. Le sujet neuf a maintenu 93% du $\dot{V}O_2$ max sur une heure. Ce sujet est d'ailleurs celui qui a le plus de succès en course. Nos sujets ont maintenu un pourcentage du $\dot{V}O_2$ max plus bas que 88% $\dot{V}O_2$ max, soit 80% $\dot{V}O_2$ max avec une étendue de 73% à 93% à PMS 60. Cependant, l'étude de Coyle et al. (1988) contrôlait la $\dot{V}O_2$ périodiquement pour assurer une charge de travail près de 88% $\dot{V}O_2$ max. Notre étude contrôlait la charge de travail plutôt que la $\dot{V}O_2$, ce qui est plus près du terrain. Parmi les essais de 60 minutes échoués mais maintenus au moins vingt minutes, ces tests démontraient un pourcentage moyen de la $\dot{V}O_2$ max de 87%. Finalement, Coyle et al. (1988) ont démontré que les cyclistes qui peuvent s'exercer à un pourcentage élevé de leur $\dot{V}O_2$ max avant d'atteindre leur "seuil anaérobie" ont de meilleures performances d'endurance. Dans notre étude, ceux qui utilisent un pourcentage élevé de leur $\dot{V}O_2$ max ne réalisent pas nécessairement une puissance de travail élevée ($r = 0,32$) à MLSS. Aussi, une dérive plus ou moins grande de la $\dot{V}O_2$ n'était pas un signe de performance. En effet, nous obtenons une corrélation pratiquement nulle ($r = 0,09$) entre la variation de la $\dot{V}O_2$ et le pourcentage d'utilisation de la $\dot{V}O_2$ max à MLSS.

Variation séquentielle des paramètres physiologiques.

À MLSS et à PMS 60, certains des neuf paramètres physiologiques ont dérivé significativement plus rapidement que d'autres, même si la puissance de travail demeure constante. L'ordre séquentiel de variation était le suivant; la $\dot{V}O_2$ / kg à 20 minutes pour la PMS 60 et à 50 minutes pour le MLSS, la fréquence cardiaque à 20 minutes pour la PMS 60, et

à 30 minutes pour le MLSS, la $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$, à 30 minutes pour la PMS 60, et à 60 minutes pour le MLSS, la VE à 30 minutes pour la PMS 60, et à 60 minutes pour le MLSS, l'indice de Borg à 30 minutes pour la PMS 60, et à 40 minutes pour le MLSS et le QR à 40 minutes pour la PMS 60 et à 20 minutes pour le MLSS. Les deux autres paramètres qui n'ont pas variés significativement sont la $\dot{V}CO_2$ et la lactatémie.

À PMS 60, la variation du pourcentage de la consommation d'oxygène maximale/kg ($\% \dot{V}O_{2max}$), était significative à partir de la vingtième minute. En fait, de la cinquième minute à la soixantième minute le pourcentage de la $\dot{V}O_{2max}$ passe de 74% à 83% respectivement pour une moyenne de 80%. À la vingtième minute, le pourcentage atteint de la $\dot{V}O_{2max}$ était déjà de 79%. Ceci indique que la demande en oxygène vers les muscles squelettiques était plus élevée à mesure que les tests continus progressaient. Après un certain temps, les muscles spécifiques au mouvement de pédalage se fatiguent, il y a plus d'unités motrices recrutées, ce qui augmente le besoin en oxygène. À cause de la fatigue neuromusculaire, certaines unités motrices des muscles synergiques seront aussi sollicitées en plus grand nombre, ce qui aurait pour effet d'augmenter la demande en oxygène.

Comparaison entre MLSS et la Puissance critique (PC)

À titre de comparaison, les sujets de notre étude ont été en mesure de maintenir un pourcentage moyen de la $\dot{V}O_{2max}$ de $76,28 \pm 2,5$ % sur une heure à MLSS, et de 80 % à PMS 60 sur une heure. McLellan et Cheung (1992) ont comparé la réponse métabolique et cardiorespiratoire aux puissances de travail représentant le MLSS et la PC. La moyenne relative du pourcentage du $\dot{V}O_{2max}$ maintenu était de $72,4 \pm 4,4$ % sur 30 min à MLSS et de $82,2 \pm 2,6$ % de la $\dot{V}O_{2max}$ sur $20,5 \pm 4,5$ min à PC. La PC a été associée à des

pourcentages de $\dot{V}O_2$ max de 60% à 100% (Moritani et al. 1981; Poole et al. 1988; Poole et al. 1990; Wilkie et al. 1981). Cette variation considérable serait inhérente à des inconstances méthodologiques. Notre étude sur le comportement de la $\dot{V}O_2$ à MLSS a donné des résultats différents de McLellan et Cheung (1992). Cette étude démontre une augmentation significative de la $\dot{V}O_2$ entre la cinquième et la vingtième minute, alors que nous n'observons une différence significative, en comparant avec la cinquième minute, qu'à partir de la cinquantième minute et ce jusqu'à la fin de l'épreuve. Il faut tout de même considérer la puissance de travail que les sujets ont déployée lors des deux études. L'étude de McLellan et Cheung (1992) ont obtenu une puissance de travail à MLSS de $234,9 \pm 44,4$ Watts sur une demi-heure, alors que nous avons obtenu une puissance de travail de $279,2 \pm 42,95$ Watts ($n = 12$), une différence de 19% pour le double de la durée. McLellan et Cheung (1992) ont obtenu une PC moyenne de $265,1 \pm 39,3$ Watts ($n = 14$) sur $20,5 \pm 4,5$ minutes, alors que notre étude obtenait une PMS 60 de $285,8 \pm 46,21$ Watts sur une heure ($n = 11$). Ces différences sont attribuables au fait que les sujets de l'étude de McLellan et Cheung (1992) ne sont pas des cyclistes d'expériences.

Bien que l'étude de McLellan et Cheung (1992) discute du besoin de standardiser la méthodologie utilisée pour estimer la PC, afin d'échanger des informations comparatives pour de futures recherches, nous croyons avant tout qu'il serait nécessaire d'analyser les besoins des athlètes sur le terrain pour inférer sur les degrés d'intensité et la durée de travail, avant de standardiser un test qui ne serait pas utile. En fait, McLellan et Cheung (1992) soutenaient qu'il ne serait pas raisonnable d'utiliser 60 minutes pour une séance d'exercice prolongé, alors que nous pensons tout à fait le contraire. Notre argument s'appuie sur le fait que la durée d'une heure reflète bien l'exigence en temps de plusieurs compétitions d'endurance. De plus, le fait d'utiliser le vélo personnel de l'athlète favorise la performance, puisque comme nous l'avons déjà mentionné, le patron de recrutement des fibres musculaires serait plus spécifique, à condition que

l'athlète utilise les mêmes vélos lors de ses entraînements journaliers et de ses compétitions. Les muscles travailleront alors de façon identique, parce qu'ils utilisent les mêmes angles appropriés à la routine. En laboratoire, les angles et la position de travail sur ergocycle sont différentes. Finalement, les méthodologies utilisées dans l'étude de McLellan et Cheung (1992) et la nôtre étaient différentes. Leur méthodologie provient des études de Stegmann et Kindermann (1981) pour le seuil anaérobie individuel (IAT) et de Monod et Scherrer (1965) pour la puissance critique, tandis que la nôtre, est nouvelle. Elle est nouvelle en ce qui a trait aux durées des paliers par rapport à Stegmann et Kindermann (1981) et à l'ininterruption des paliers de 8 min par rapport à Foxdal et al. (1996) qui utilise une pause entre les paliers d'effort. Finalement, nous avons utilisé le point de repère du 4 mM pour cibler l'intensité du travail à accomplir, alors que McLellan et Cheung (1992) utilisent la récupération pour alléguer une puissance de travail relative au seuil anaérobie individuel (IAT) en utilisant un modèle mathématique.

Futures recherches

Pour des recherches ultérieures sur le cyclisme, il serait donc utile d'envisager un modèle de puissance soutenable en fonction du temps. Jusqu'à maintenant, les recherches sur le seuil anaérobie individuel (MLSS) ou *individual anaerobic threshold* (IAT) n'ont pas permis de quantifier une relation puissance-temps intéressante pour les cyclistes. En fait, il s'agirait de développer un modèle de puissances critiques, d'où le point central serait le MLSS. Un modèle semblable à celui développé par Morton et al. (1996), c'est-à-dire, une courbe hyperbolique asymptote mais ayant comme un des points de référence le MLSS. Ce modèle impliquerait tous les systèmes d'énergie, anaérobie alactique et lactique en puissance et en capacité, une puissance de travail aérobie par un test de temps limite à $\dot{V}O_2$ max, ainsi que la capacité aérobie de longue durée. Ce modèle servirait aux entraîneurs pour vérifier le profil physiologique

des athlètes en une seule figure. L'avantage pour l'entraîneur serait de visualiser les aspects physiologiques généraux de ses athlètes pour intervenir sur des systèmes en particulier. Ainsi, l'intervention sur un système pourrait modifier un autre système à la hausse ou à la baisse. L'entraîneur serait en mesure d'apprécier les changements voulus et d'assurer une progression synergique de tous les systèmes requis à sa discipline.

Pour améliorer les capacités des athlètes à contrôler les effets de la fatigue et améliorer leurs performances, il devient avantageux de suivre l'évolution du MLSS et de la PMS 60 à travers les phases d'entraînement de leur cycle annuel et pluriannuel. L'intervenant auprès des athlètes s'offre la possibilité, en utilisant le test TPM, de mieux contrôler et évaluer les variations physiologiques associées aux puissances de travail fournies en prévision d'événements compétitifs. Afin d'apprécier le rendement des athlètes, l'entraîneur conserve et compare les résultats des tests TPM à différents cycles pour s'assurer que les athlètes s'améliorent.

CHAPITRE VI

Conclusion

Cette étude avait pour but de valider un test progressif maximal avec paliers de huit minutes en employant des cyclistes entraînés sur leur propre vélo pour déterminer le MLSS. Les résultats de cette expérience ont démontré la reproductibilité de ce test ($r = 0,98$). Onze sujets sur douze ont complété le premier test continu de 60 minutes suite à l'estimation faite à partir du test progressif. Huit sujets sur douze obtenaient leurs MLSS dès le premier essai. L'utilisation de paliers de huit minutes pourrait être à l'origine d'une telle précision. Aussi, en supprimant les prélèvements post-exercice cela rend le test plus facile à administrer. Finalement, pour effectuer ce test, il n'est pas nécessaire d'aller au laboratoire. Un entraîneur bien formé équipé d'un simulateur de route à freinage électromagnétique, d'un analyseur de lactate portatif et d'une montre cardiofréquence-mètre peut exécuter ce test. Il ne s'avère plus nécessaire d'exécuter un test maximal pour prédire l'état stable de lactatémie, puisque les prélèvements post-exercices ne sont plus nécessaires.

À une charge de travail à 2,4 pourcent supérieur au MLSS, il s'avère difficile de maintenir une charge de travail pendant 60 minutes. Cette puissance de travail au-dessus du MLSS s'avère être une puissance maximale soutenable sur 60 minutes (PMS 60). Cette étude nous a permis de vérifier que même en maintenant l'état stable lactatémique, d'autres paramètres physiologiques variaient significativement pendant le test continu (MLSS) de 60 minutes. Nous avons aussi constaté l'existence d'une variation séquentielle de ces mêmes paramètres physiologiques. La fréquence cardiaque, la $\dot{V}O_2$, la $\dot{V}E / \dot{V}CO_2$, la $\dot{V}E$, l'indice de Borg et le QR ont tous varié à différents moments à MLSS et à PMS 60.

RÉFÉRENCES

- Belcastro A. N., Bonen A. Lactic acid rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *J. Appl. Physiol.* 39: 932-936, 1975.
- Billat V., Dalmay F., Antonini M. T., Chassain A. P. A method for determining the maximal steady state of blood lactate concentration from two levels of submaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 196-202, 1994.
- Brooks G. A. Lactate production under fully aerobic conditions: the lactate shuttle during rest and exercise. *Federation Proc.* 45: 2924-2929, 1986.
- Cane J., Seidman B., Sowash J., Otto R.M. A comparaison of the computrainer load simulator and traditional ergometry. *Med Sci. Sports Exerc.* 1996.
- Chassain A. P. Méthode d'appréciation objective de la tolérance de l'organisme à l'effort: application à la mesure des puissances critiques de la fréquence cardiaque et de la lactatémie. *Science et Sports*, 1: 41-48, 1986.
- Cohen B., Schwarz L., Urhausen A., Kindermann W. Control of training in middle and long distance running by means of the individual anaerobic threshold. *Int. J. Sports Med.* 12: 519-524, 1991.

Coyle E. F., Coggan A. R., Hopper M. K., Walter T. J. Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 64: 2622-2630, 1988.

Coyle E.F., Feltner M. E., Kautz S. A., Hamilton M.T., Montain S.J., Baylor A.M., Abraham L.D., Petrek G. W. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23, 93-107, 1991.

Ekeleund, L.G. Circulatory and respiratory adaptations during prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.* 292, Suppl.: 70, 5-38, 1967.

Foxdal P., Sjödin A., Sjödin B. Comparaison of blood lactate concentrations obtained during incremental and constant intensity exercise. *Int. J. Sports Med.* 17: 360-365, 1996.

Freund P. R., Rowell L. B., Murphy T. M., Hobbs S. F., Butler S. H. Blockade of the pressure response to muscle ischemia by sensory nerve block in men. *Am. J. Physiol.* 236, H433-H439, 1979.

Galbo H., Holst J. J., Christensen N. J. Glucagon and plasma catecholamine responses to graded and prolonged exercise in man. *J. Appl. Physiol.* 55. 884-890, 1975.

Gertz E. W., Wisneski J.A., Neese R., Bristow J. A., Searl G. L., Hanlon J. T. Myocardial lactate metabolism: evidence of lactate release during net chemical extraction in man. *Circulation.* 63: 1273-1279, 1981.

- Hamilton M. T., Gonzalez-Alonso J., Montain S. J., Coyle E. F. Fluid replacement and glucose infusion during exercise prevent cardiovascular drift. *J. Appl. Physiol.* 71: 871-877, 1991.
- Heck H., Mader A., Hess G. Mücke S., Müller R., Hollmann W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold, *Int. J. Sports Med.* 6: 117-130, 1985.
- Hill D. W. The critical power concept. *Sports Med.* 16 (4): 237-254, 1993.
- Holden S.-H., MacRae S. C. Dennis, A. N. Bosch, and T. D. Noakes. Effects of training on lactate production and removal during progressive exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* 72: 1649-1656, 1992.
- Holloszy J. O., Coyle E. F. Adaptation of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl. Physiol.* 56: 831-838 , 1984.
- Housh D. J., Housh T. J., Bauge S. M. The accuracy of the critical power test for predicting time to exhaustion during cycle ergometry. *Ergonomics*, 32: 997-1004, 1989.
- Housh T. J., DeVries H. A., Housh D. J., Tichy M. W., Smyth K.D., Tichy A.M. The relationship between critical power and the onset of blood lactate accumulation. *J. Sports Med. and Physical Fitness*, 31: 31-36, 1991.
- Jackson A. S., Pollock M. L. Prediction accuracy of body density, lean body weight, and total body volume equations. *Med. Sci. Sports*, 9: 197, 1977.

- Jenkins D. G., Quingley B. M. Blood lactate in trained cyclists during cycle ergometry at critical power. *Eur. J. Appl. Physiol.* 61: 278-283, 1990.
- Jorfeldt L., Juhlin-Dannfelt A., Karlsson J. Lactate release in relation to tissue lactate in human skeletal muscle during exercise. *J. Appl. Physiol.* 44: 350-352, 1978.
- Juel C., Kristiansen S., Pilgaard H., Wojtaszewski J., Richter E. A. Kinetics of lactate transport in sarcolemmal giant vesicles from human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* 76: 1031-1036, 1994.
- Lind A. R. Cardiovascular adjustments to isometric contractions: static effort. In J.T. Shepherd, F.M. Abboud, and S.R. Geiger, eds. *Handbook of physiology. The Cardiovascular System: Peripheral Circulation and Organ Blood Flow*, sect. 2: 947-966. American Physiological Society, Bethesda, MD.
- MacRae H.S.H., Dennis S.C., Bosch A.N., Noakes T.D. Effects of training on lactate production and removal during progressive exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* 72(5): 1649-1656, 1992.
- Mader A. Liesen H., Heck H., Philippi H., Schürch P.M., Hollman W. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit. *Sportarzt Sportmed.* 27 (4, 5): 80-88, 109-112, 1976.
- McDermott J. C., Bonen A. Endurance training increase skeletal muscle lactate transport. *Acta Physiol. Scand.* 147: 323-327, 1993.

- McLellan T. M., Skinner J. S. Blood lactate removal during active recovery related to the aerobic threshold. *Int. J. Sports Med.* 3: 224-229, 1982.
- McLellan T.M., Cheung K.S.Y., Jacobs I. Incremental Test Protocol, Recovery Mode and the Individual Anaerobic Threshold. *Int. J. Sports Med.* 12: 190-195, 1991.
- McLellan T.M., Cheung K.S.Y. A comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24:543-550, 1992.
- McLellan T.M., Jacobs I. Reliability, reproductibility and validity of the individual anaerobic threshold. *Eur. J. Appl. Physiol.* 67: 125-131, 1993.
- Mognoni P., Sirtori M. D., Lorenzelli F., Cerretelli P. Physiological responses during prolonged exercise at the power output corresponding to the blood lactate threshold. *Eur. J. Appl. Physiol.* 60: 239-243; 1990.
- Monod H., Scherrer J. The work capacity of synergic muscle group. *Ergonomics.* 8: 329-338, 1965.
- Moritani T.A., Nagata H.A., deVries H.A., Muro M. Critical power as a mesure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 24: 1413-1419, 1981.
- Morton H. R. A 3-parameter critical power model. *Ergonomics.* 39, 4: 611-619. 1996.

- Overend T. J., Cunningham D. A., Paterson D. H., Smith W. D. F. Physiological responses of young and elderly men to prolonged exercise at critical power. *European J. Appl. Physiol.* 64: 187-193, 1992.
- Oyono-Enguelle S., Heitz A., Marbach J., Ott C., Gartner M., Pape A., Vollmer J. C., Freund H. Blood lactate during constant-load exercise at aerobic and anaerobic threshold. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 60: 239-243, 1990.
- Poole D. C., Ward S. a., Gardner G. W., Whipp B. J. A metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*. 31: 1265-1279, 1988.
- Poole D. C., Ward S.A., Whipp B. J. The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 59: 421-429, 1990.
- Richter E. A., Kiens B., Saltin B., Christensen N. J., Savard G. Skeletal muscle glucose uptake during dynamic exercise in humans: role of muscle mass. *Am. J. Physiol.* 254: E555-E561, 1988.
- Roth D.A., Brooks G. A. Lactate transport is mediated by a membrane-bound carrier in rat skeletal muscle sarcolemmal vesicles. *Arch. Biochem.* 279: 377-385, 1990.
- Rowell L. B. Cardiovascular Central. *Oxford University Press*, New York, 1993, p. 229.
- Scarborough P. A., Smith J. C., Talbert S. M., Hill D. W. Time to exhaustion at the power asymptote in men and women. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23: S12, 1991 (Abstract).

Steed J. C., Gaesser G. A., Weltman A. Rating of perceived exertion (RPE) as markers of blood lactate concentration during rowing. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 797-803, 1994.

Snyder A. C., Foster C., Woulfe T. J. Prediction of maximal lactate steady state. *Med. Sci. Sports Exerc.* S22. 1989.

Stanley W. C., Gertz E. W., Wisniewski J. A., Morris D. L., Neese R. A., Brooks G. A. Systemic lactate kinetics during graded exercise in man. *Am. J. Physiol.* E595-E602, 1985.

Stegmann H., Kindermann W., Schnabel A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int. J. Sports Med.* 2: 160-165, 1981.

Stegmann H., Kindermann W. Comparaison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 Mm Lactate. *Int. J. Sports Med.* 3: 105-110, 1982.

Trudeau F., Milot M., Paré M., Plourde K. Réponses plasmatiques et ajustement de l'intensité d'exercice par la fréquence cardiaque ou la charge de travail. *Science & Sports* 12: 123-128, 1997.

Urhausen A., Cohen B., Weiler B., Kindermann W. Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. *Int. J. Sports Med.*, 14(3): 134-139, 1993.

Weltmann A., Snead D., Stein P., Seip R., Scurrer R., Rutt R., Weltman J. Reliability and validity of a continuous incremental treadmill protocol for the determination of lactate threshold, fixed blood lactate concentrations, and $\dot{V}O_2$ max. *Int. J. Sports Med.* 11: 26-32, 1990.

Weltman A. (1995). *The blood lactate response to exercise* (monograph number 4). Champaign, IL. Human Kinetics.

ANNEXES

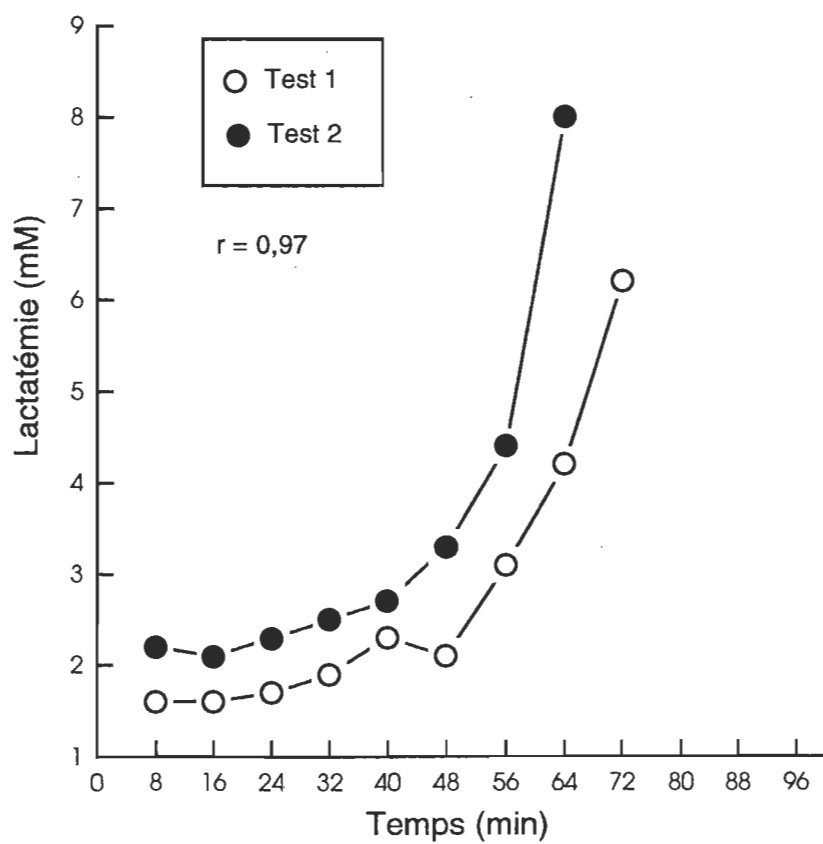


Figure A1. Reproductibilité des tests progressifs maximaux pour le sujet un.

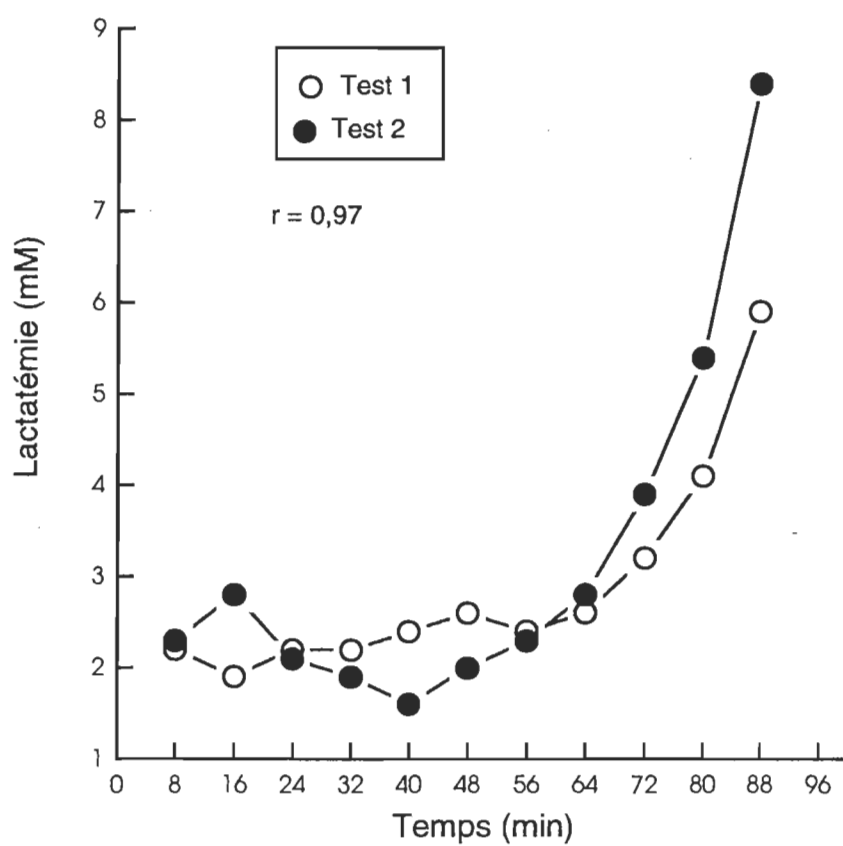


Figure A-2. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 3.

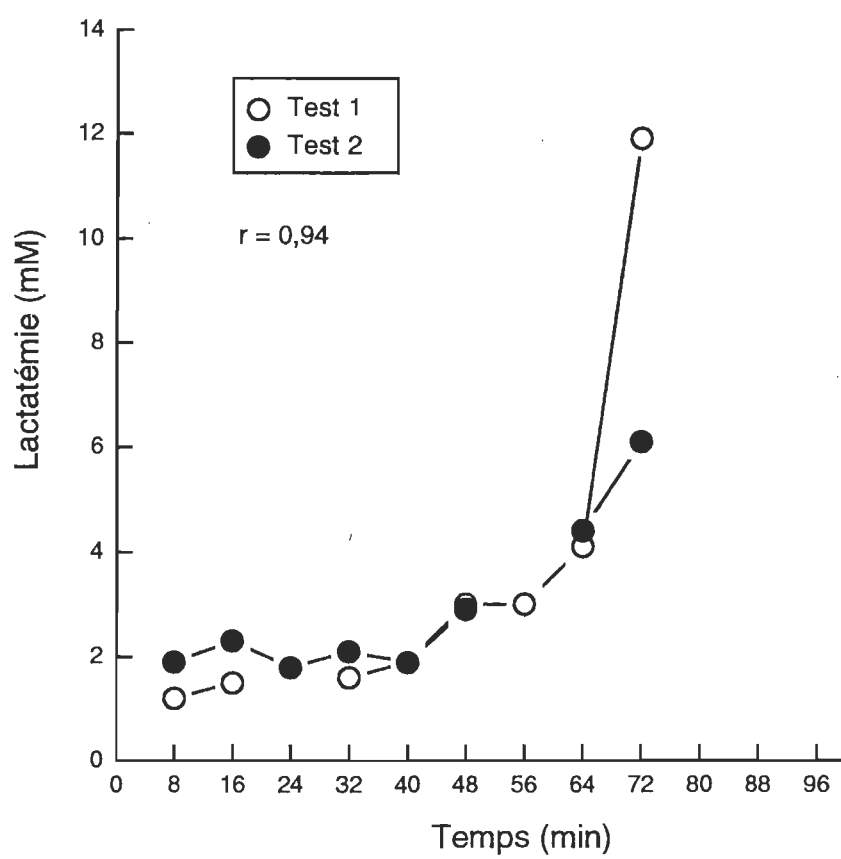


Figure A-3. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 4.

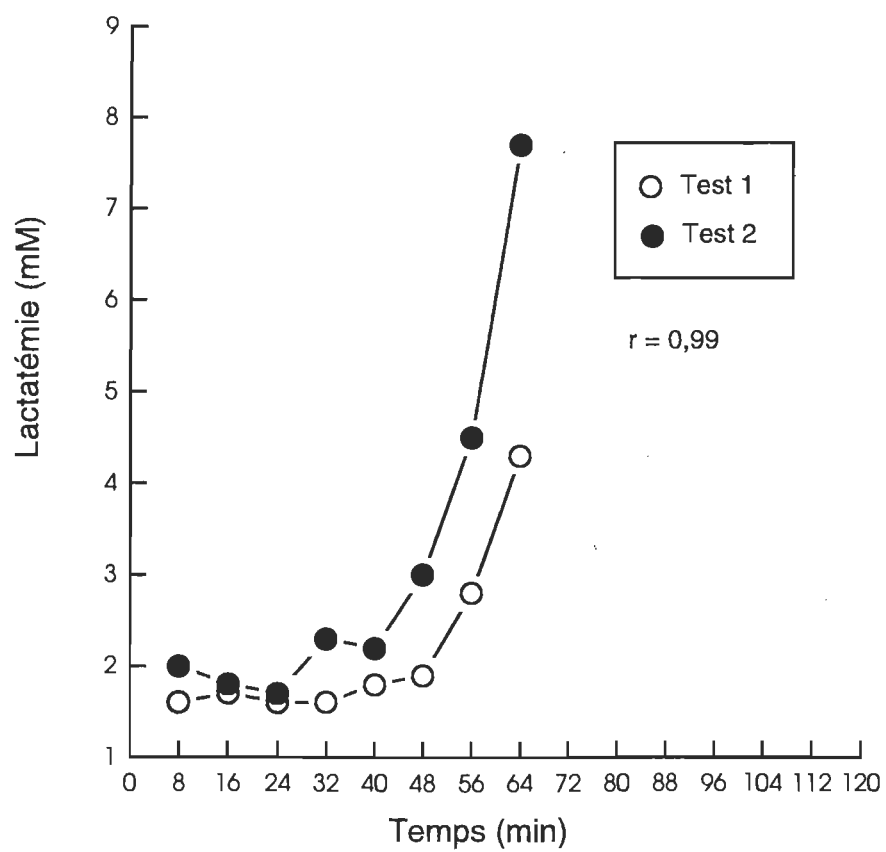


Figure A-4. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 5.

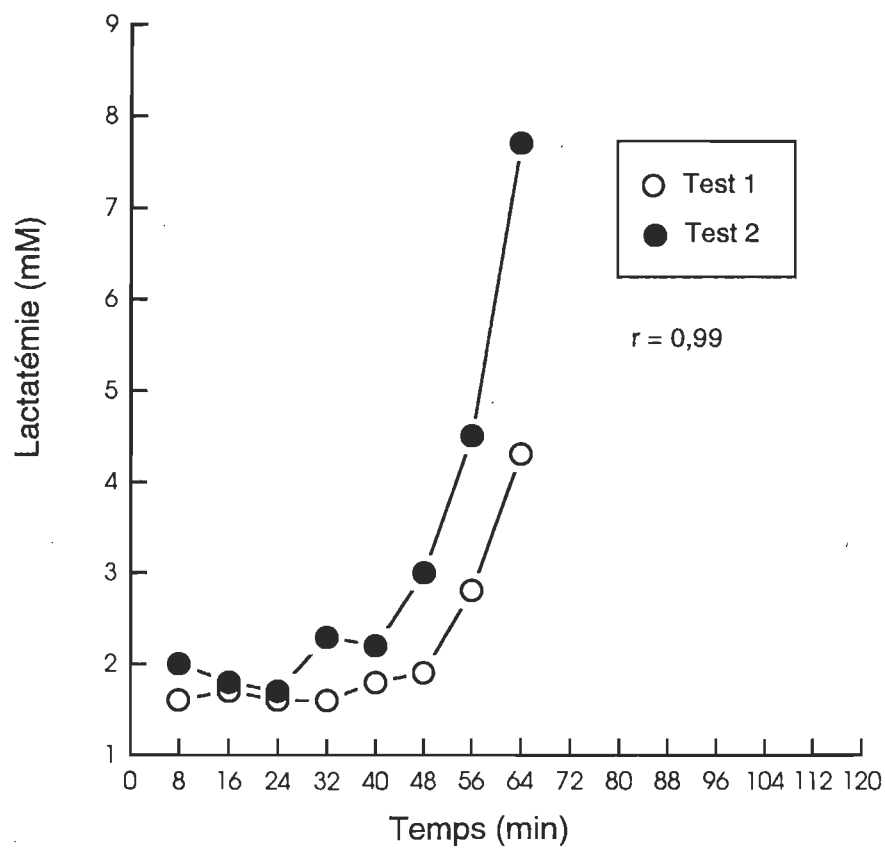


Figure A-5. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 6.

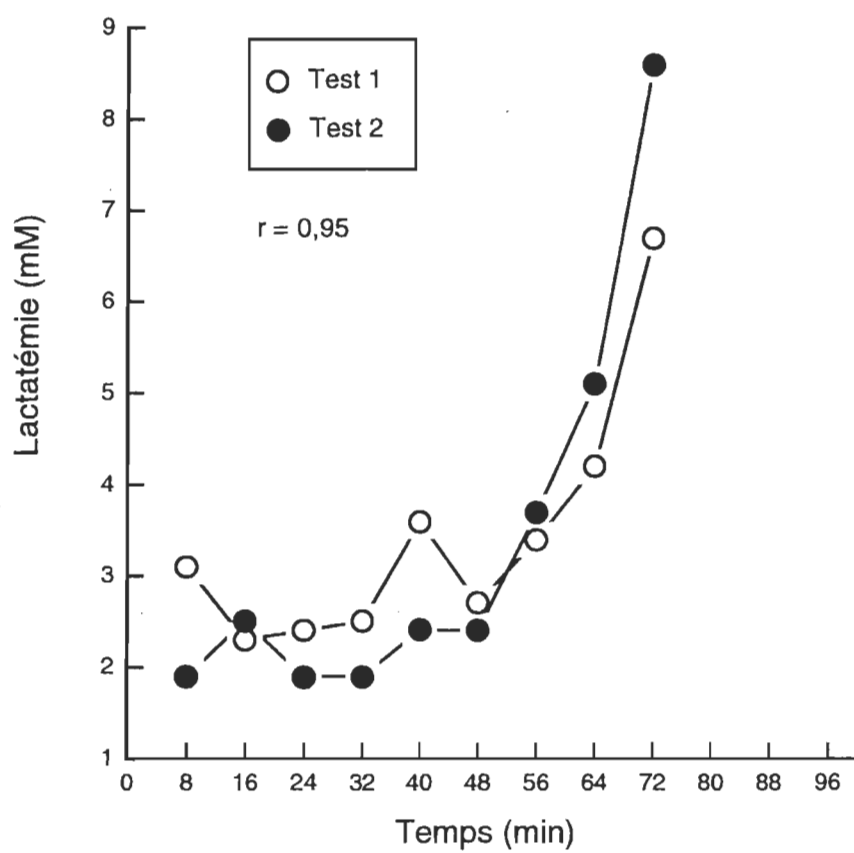


Figure A-6. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 7.

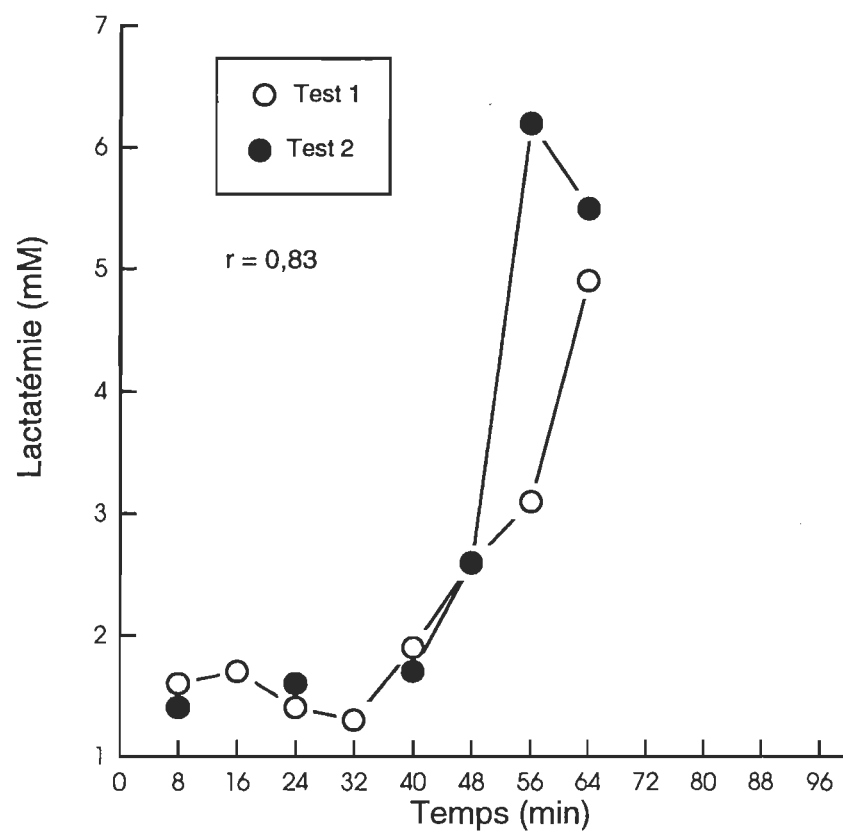


Figure A-7. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 8.

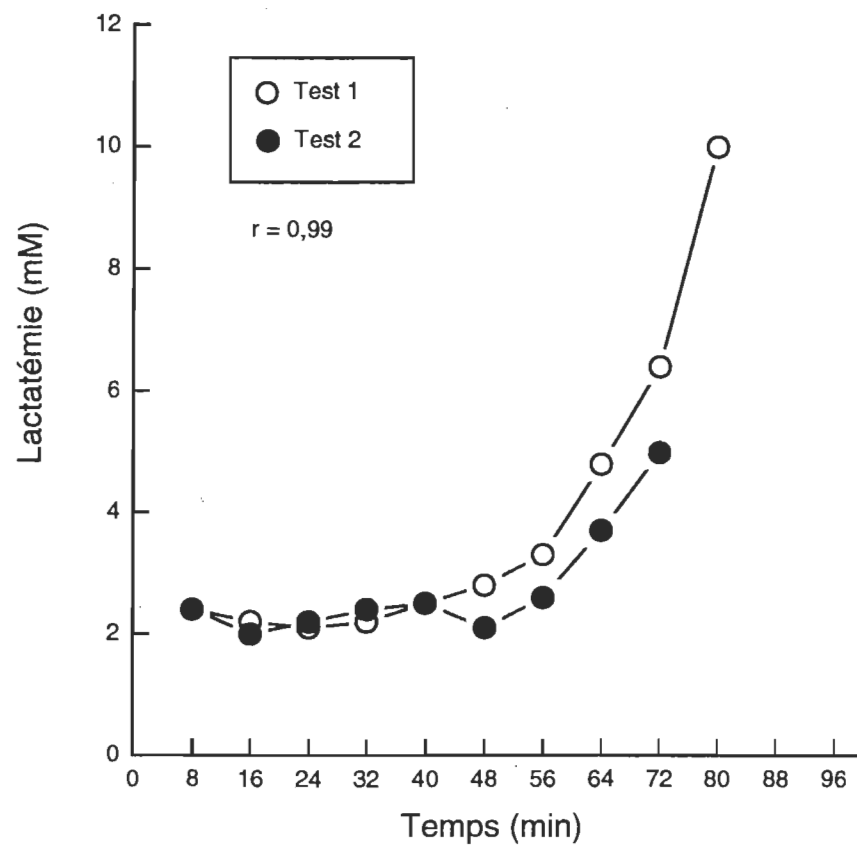


Figure A-8. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 9.

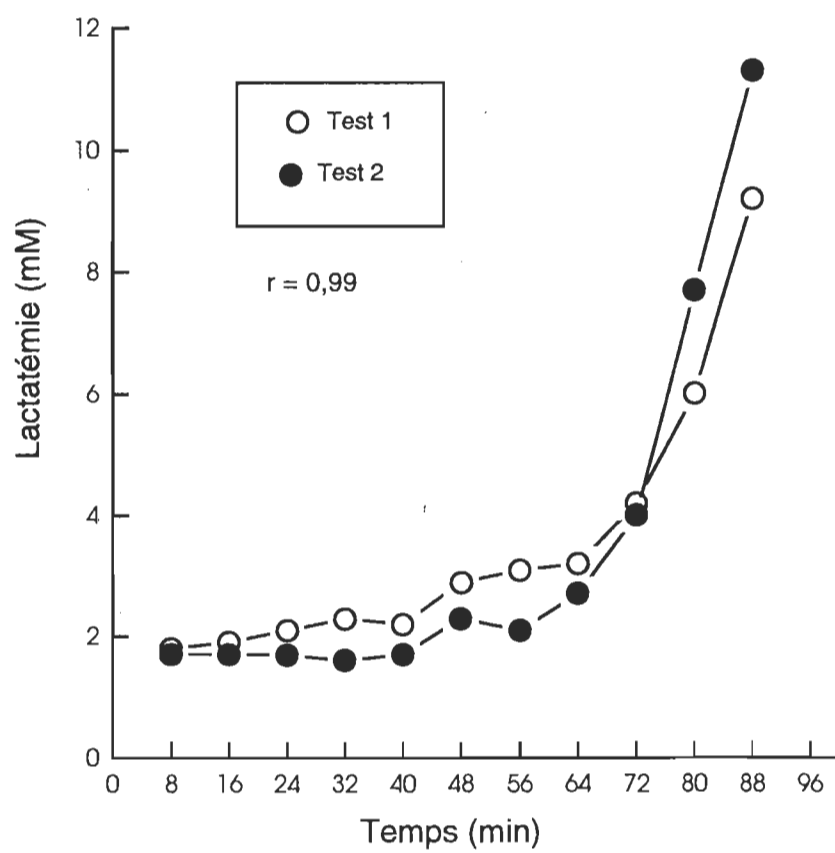


Figure A-9. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 11.

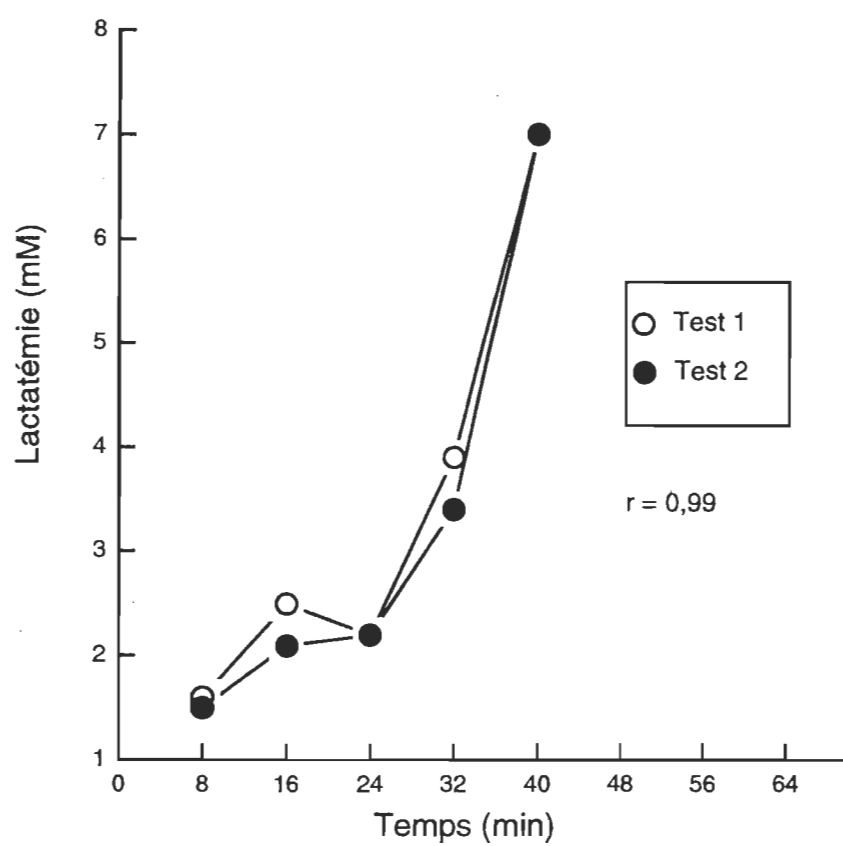


Figure A-10. Reproductibilité des tests progressifs maximaux chez le sujet 12.

Tableau A-1

Paramètres physiologiques	5	10	20	30	40	50	60	$\Delta 5-60$	moy.
QR	1,06	1,00	0,99	0,98	0,97	0,97	0,97	-0,05	0,98
VE / VCO ₂	20,92	21,75	22,22	22,76	23,05	23,49	23,9	2,98	22,5

Tableau A-2

Relation entre la masse du cycliste, sa PMS 60 et sa puissance maximale aérobie (PMA).
 Rapport entre la PMA et la PMS 60. Quotient entre la PMA et la masse du sujet. Quotient
 entre la PMS 60 et la masse du sujet.

Sujet	Masse (kg)	PMS 60 (Watts)	PMA (Watts)	PMS 60/PMA (%Watts)	PMA/Kg (Watts/kg)	PMS 60/Kg (Watts/kg)
1	69,6	290	420	69	6,03	4,17
2	69,9	250	340	73,5	4,86	3,58
3	78,8	360	460	78,3	5,84	4,57
4	72	310	420	73,8	5,83	4,31
5	70,7	300	380	79	5,37	4,24
6	77,5	230	340	67,7	4,39	2,97*
7	71,6	27	340	79,4	4,75	3,77
8	66,6	310	380	81,6	5,71	4,65
9	61,4	320	380	84,2	6,19	5,21
10	66,5	280	420	66,7	6,31	4,21
11	65,5	330	460	71,7	7,02	5,04
12	53,4	190	260	73,1	4,87	3,56
Moy.	68,6	286,7	383,3	74,8	5,60	4,19
É-T	6,82	46,58	57,74	5,64	0,77	0,64

* Ce sujet était beaucoup plus âgé que la moyenne (46 ans).